Energy, Mines and Resources Canada | Énergie, Mines et Ressources Canada

CANMET

Canada Centre for Mineral and Energy Technology | Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie

ÉTUDE PRELIMINAIRE DU SLUICE

J.-M. Lamothe

Laboratoire de Traitement des Minéraux

juin 1984

This document is an unedited report prepared primarily for discussion and internal reporting purposes. It does not represent a final expression of the opinion of the Canada Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET)

Ce document est un rapport préliminaire non-révisé et rédigé principalement pour fin de discussion et de documentation interne. Il ne représente nullement l'expression définitive de l'opinion du Centre canadien de la technologie des minéraux et de l'énergie (CANMET)

Projet ERP 4.3.1.0.02

Charbon sulfureux

MICROMEDIA

5719

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR L'ÉNERGIE
LABORATOIRES DES SCIENCES MINÉRALES
RAPPORT DE LA DIVISION ERP/MSL 84-71(IR)

RÉSUMÉ

Les essais sur le sluice avaient pour but d'étudier ses performances de façon préliminaire et possiblement de vérifier les données du manufacturier à cet égard.

Les deux premiers essais ont porté sur l'ébauchage d'un minerai de fer à différentes concentrations, à savoir des pulpes contenant 30% et 65% de solides respectivement. Dans un dernier essai, on a étudié l'efficacité du lavage du charbon sur le sluice.

A l'analyse des résultats obtenus avec le minerai de fer, on constate qu'avec un angle de 17 degrés d'inclinaison de la planche le sluice donne une récupération en métal et une teneur de concentré plus élevées qu'avec tout autre angle étudié. Les résultats démontrent également qu'une plus grande sélectivité est obtenue lorsque le couteau est ajusté à ses positions extrêmes. Enfin, le pourcentage de solides à la pulpe d'alimentation a une influence marquée sur les résultats; les meilleurs étant obtenus pour une concentration de 65% en solides.

Les essais faits sur le lavage du charbon ne sont pas concluants aux angles d'inclinaison étudiés: en effet, les récupérations obtenues et les teneurs en cendres des concentrés ne furent pas satisfaisantes. De plus, on n'a pu établir de relation évidente entre les teneurs en cendres des produits du sluice et son angle d'inclinaison, ni d'ailleurs avec la position du couteau.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ	i
1. APPAREIL ET TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE	1
1.1 Sluice	1
1.2 Montage	1
1.3 Etude expérimentale	5
2. DISCUSSION DES RÉSULTATS	6
2.1 Série d'expériences I (65% solide)	6
2.2 Série d'expériences II (30% solide)	8
2.3 Série d'expériences III (charbon)	10
CONCLUSION	11
ANNEXE A Série I	13
Résultats et figures	14
ANNEXE B Série 2	24
Résultats et figures	25
ANNEXE C Série 3	33
Résultats et figures	34
ANNEXE D	44
Calculs statistiques	44

1. APPAREIL ET TECHNIQUE EXPÉRIMENTALE

1.1 Sluice

Le sluice utilisé au cours des essais comporte essentiellement une planche inclinable munie à l'extrémité supérieure d'une boîte d'alimentation et à l'autre bout d'une double boîte réceptrice à deux orifices. Cette dernière sert également de support à un couteau diviseur, lequel est ajusté de façon à répartir les produits de l'appareil (figure 1).

Son principe de séparation est basé sur la gravité spécifique des minéraux. Il est donc essentiel d'avoir un écart suffisant entre les densités respectives des substances de valeur à récupérer et la gangue à rejeter.

La pulpe tout venant est acheminée au moyen d'un tuyau et déversée sur la planche par la boîte d'alimentation (figure 2). Le minerai s'étend sur le fond du sluice, puis descend au sein d'un écoulement laminaire. Le sluice se rétrécit progressivement à partir du haut vers le bas. Ceci force les particules légères à être entrainées par l'écoulement gonflé pendant que les particules lourdes poursuivent leur descente au fond de la planche. Au bas de la planche un couteau sépare le flot en deux produits distincts, lesquels sont alors dirigés dans leurs orifices respectifs.

1.2 Montage

Le montage utilisé tel qu'illustré à la figure 3 possède les avantages suivants:

1. Il permet l'utilisation du sluice ou de la spirale avec une même alimentation.
2. Il utilise un échantillonneur automatique.
3. Une pompe à déplacement positif variable est utilisée pour des pulpes denses.
4. Le circuit est simple et façile à manipuler en conditions normales.
5. Une cloche d'air élimine les secousses causées par les vibrations de la pompe dans les tuyaux.
6. La boite distributrice permet de réduire le débit de la pulpe au sluice.
7. L'utilisation d'une pompe à puisard à grande vitesse achemine le retour de la pulpe dense au réservoir sans la surveillance constante d'une personne.

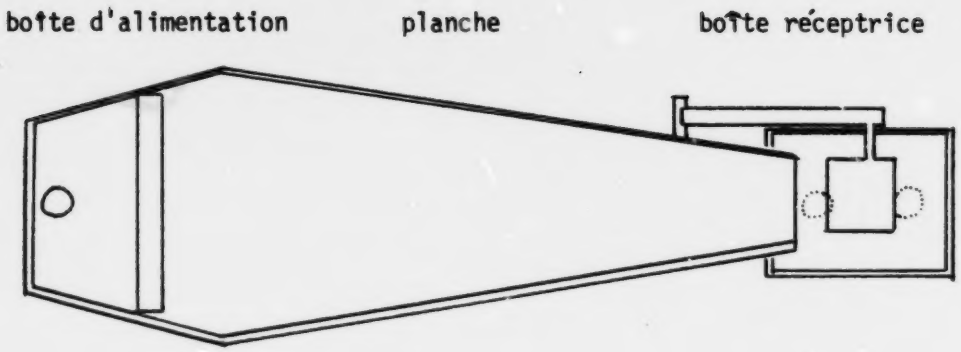

Figure 1. Plan du sluice. La longueur de la planche est de 30 pouces.

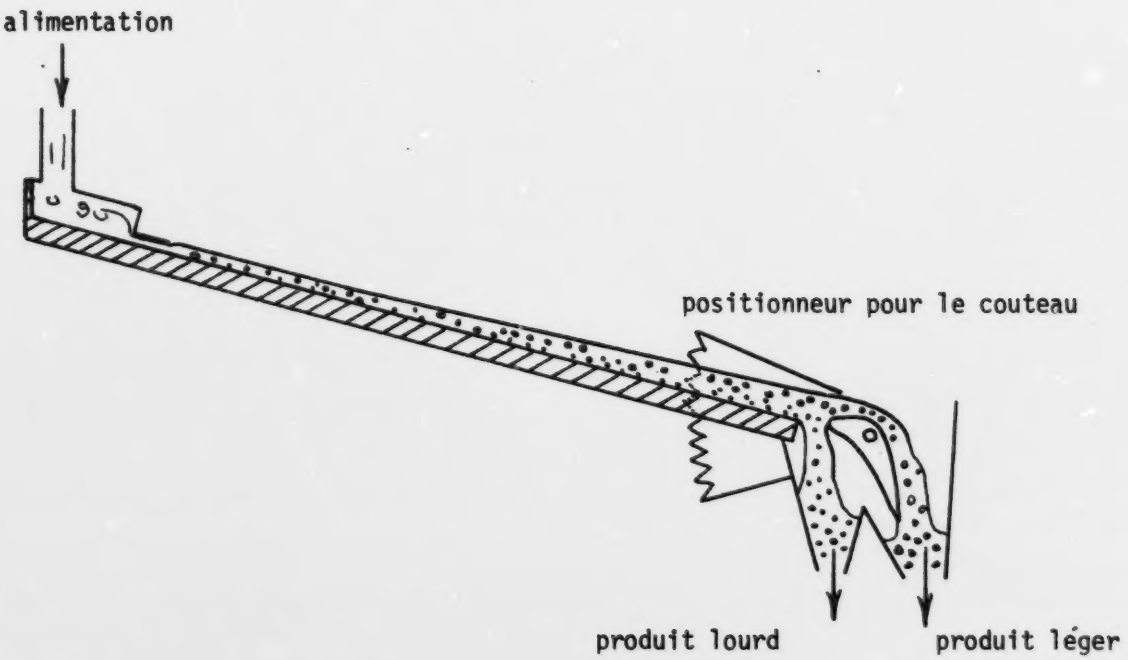

Figure 2. Coupe du sluice.

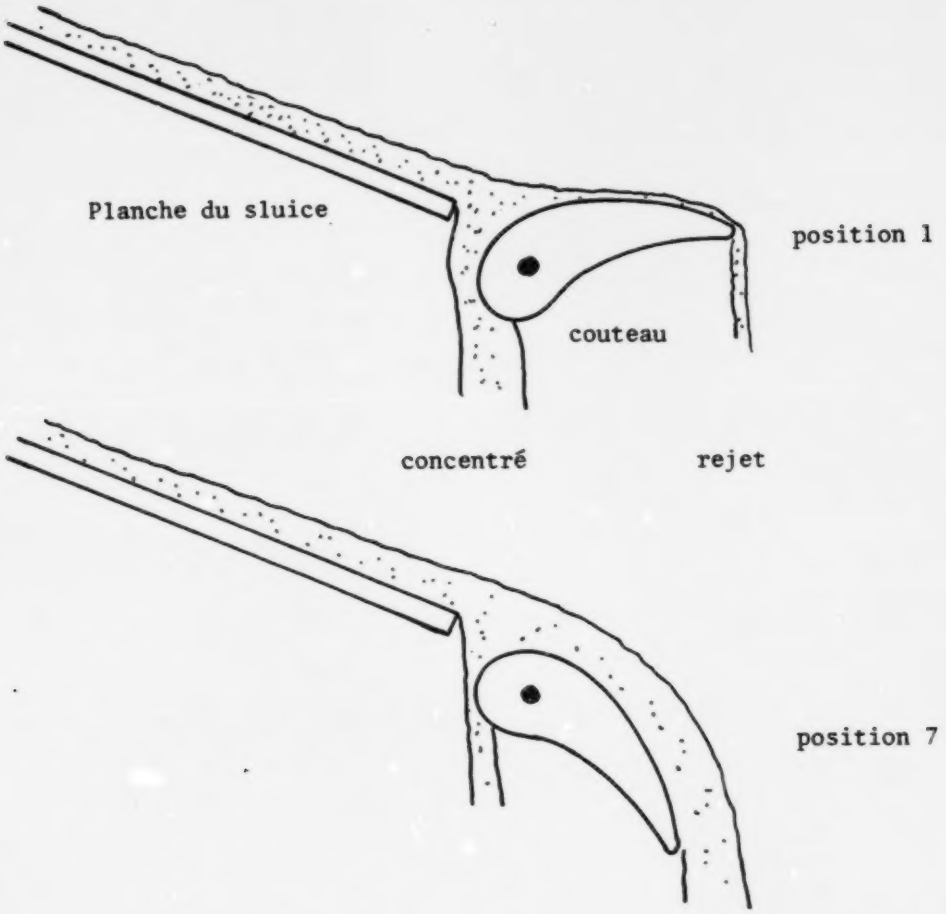

figure 3A. Exemple de position du couteau.

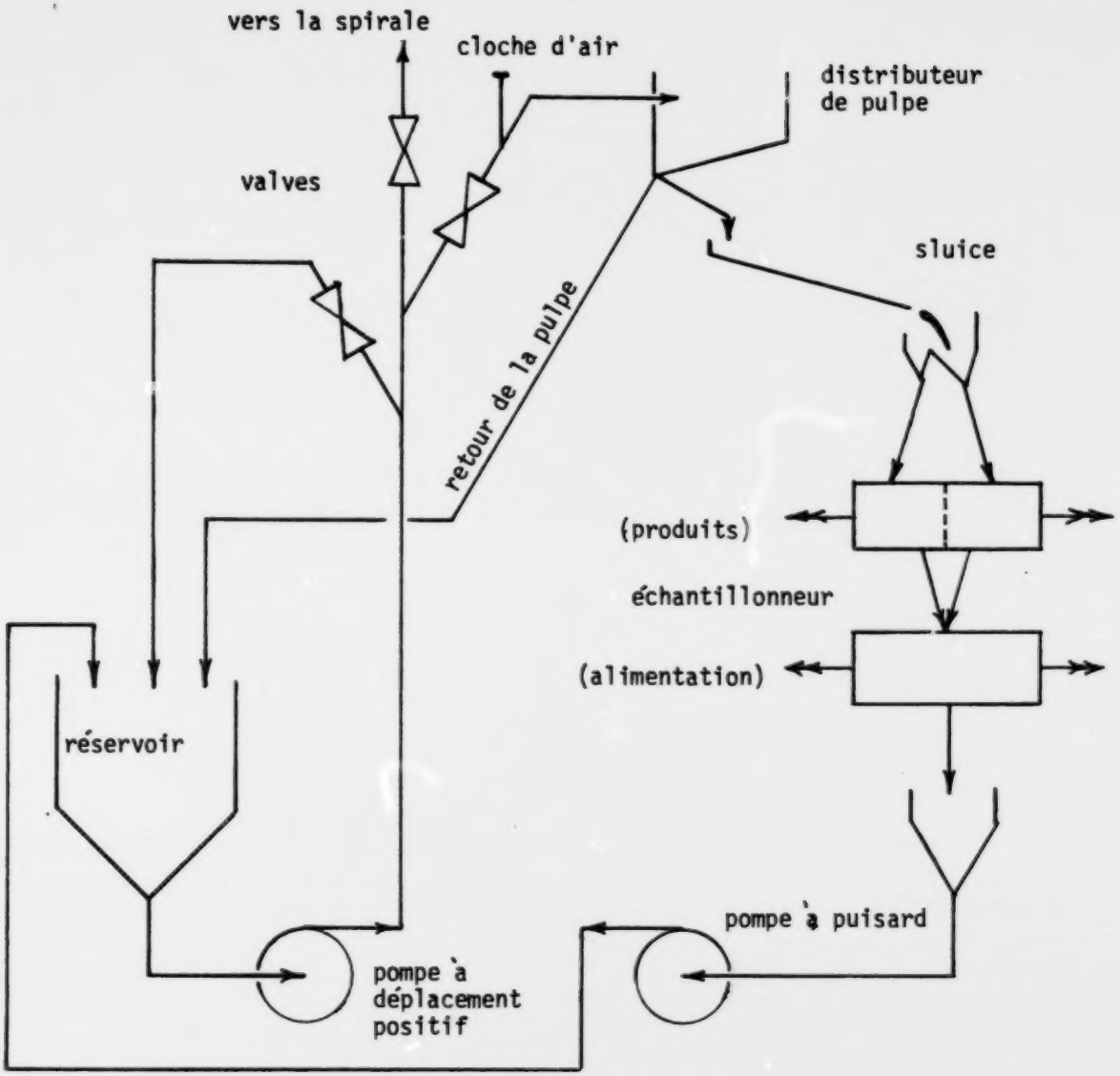

Figure 3. Diagramme du circuit utilisé.

1.3 Etude expérimentale

1.3.1 Série d'expériences I

L'essai avait pour but de vérifier le fonctionnement du sluice. Pour atteindre cet objectif sans problème de libération des grains, on a utilisé un minerai de fer (silice-hématite) en provenance du nord-est du Québec, après un broyage à une finesse de -35 mailles.

Pour obtenir les meilleurs résultats lors de la séparation d'un minrai de fer, le manufacturier recommende une inclinaison de 17 degrés de la planche pour une pulpe à 65% solide.

Les conditions expérimentales furent:

- Alimentation de 1.5 tm/heure de minerai, soit 2.31 tm/heure de pulpe.
- Pulpe à 65% solide.
- Essais sur les angles suivants: 15, 17, 18 et 21 degrés.

Un angle d'au moins de 15 degrés s'avera necessaire pour éviter toute sédimentation.

- Différentes positions du couteau pour chaque inclinaison étudiée.

1.3.2 Série d'expériences II

Lors de ce test, on a voulu faire une comparaison préliminaire entre la densité de la pulpe de l'essai 1 et celle de l'essai 2. Les conditions du test ont été:

- Même débit volumique qu'à l'essai 1.
- Pulpe à 30% solide.
- Essais sur les angles suivants: 13.5, 15, 17, 18 et 21 degrés.

Un angle de 13.5 degrés fut suffisant à cette dilution pour éviter la sédimentation.

- Différentes positions du couteau pour chaque inclinaison étudiée.

1.3.3 Série d'expériences III

Une dernière série d'expériences fut effectuée sur du charbon avec comme objectif principal de déterminer l'efficacité de concentration du sluice sur ce minerai.

Pour éviter les problèmes relatifs à la libération de la pyrite asscciée au charbon, on a utilisé un charbon brut provenant de l'ouest canadien et contenant peu de soufre. Le but de l'étude était d'établir l'efficacité de sluice pour séparer du charbon (densité spécifique d'environ 1.40 g/ml) de la gangue (composée principalement de schiste ayant une densité spécifique de l'ordre de 3,00 g/ml).

Les conditions de l'expérience furent fixées comme suit:

- même débit volumique que l'essai 1
- pulpe à 20% solide
- granulometrie de moins de 14 mailles
- essais sur les inclinaisons suivantes: 7, 8.5 et 13.5 degrés
- différentes positions du couteau pour chaque inclinaison étudiée.

En utilisant la pulpe préparée pour le sluice, on a également expérimenté la séparation gravimétrique du charbon à l'aide de la spirale d'Humphrey.

2. DISCUSSION DES RÉSULTATS

2.1 Série d'expériences I

2.1.1 Alimentation

En se référant aux données de l'alimentation (tableau 1) on remarque une variation importante du pourcentage de solides dans la pulpe. Un test statistique d'ailleurs a démontré avec 95% de certitude que la pulpe se dilue à mesure que l'échantillonnage progresse. De plus, un calcul similaire réalisé à partir des teneurs en fer de l'alimentation démontre avec 95% de certitude que le minerai s'appauvrit également (figure 4).

Ces deux phénomènes pourrait s'expliquer par le fonctionnement inefficace des agitateurs dans le réservoir. Si l'on suppose que ceux-ci ne réussiraient pas à bien mélanger la pulpe, le réservoir agirait alors comme un épaississeur. La pulpe pompée de la sousverse vers le sluice aurait donc un pourcentage de solides plus élevé que la pulpe dans le réservoir. Puisque l'alimentation était grossière (60% -120$m) et que les grains d'hématite sédimentent plus rapidement que ceux de silice (pour un diamètre donné), on assiste également à un enrichissement en fer de la pulpe à la sousverse du réservoir. L'échantillonneur puiserait donc une pulpe plus dense et plus riche, d'ou un appauvrissement du circuit.

2.1.2 Concentrés

La teneur en fer du concentré varie en fonction de la position du couteau (figure 5). En effet, pour chaque inclinaison de la planche, en excluant 21 degrés, cette teneur suit une relation linéaire inverse avec l'ordre

numérique de la position du couteau. D'autre part, la teneur en fer du concentré augmente avec l'inclinaison croissante de la planche. Cette dernière observation s'explique facilement par l'accroissement de la vitesse d'écoulement de la pulpe. Plus l'angle d'inclinaison est grand, plus le matériel léger est emporté par le débit du flot; il en résulte donc un enrichissement du concentré.

2.1.3 Rejets

Les différentes positions du couteau influencent également la teneur en fer du rejet (figure 7). Cependant la linéarité n'apparait pas aussi évidente que dans le cas du concentré.

2.1.4 Rendements

Les courbes de rendement du fer ont été calculées 1) soit "algébriquement" à partir des analyses, 2) soit "arithmétiquement" à partir de poids et analyses du concentré et du rejet. Ces courbes s'apparentent assez bien (figures 9 et 10). Le rendement metal à un angle de 17 degrés est supérieur à ceux obtenus avec les autres angles d'inclinaison de la planche. De plus à cet angle le rendement est moins affecté par la position du couteau.

2.1.5 Comparaisons

Pour comparer les différents essais et choisir la meilleure combinaison (angle de la planche et position du couteau), deux méthodes d'évaluation furent utilisées:

1) Indice de sélectivité

La planche sert à récupérer le minéral désiré et à éliminer la gangue. L'indice de sélectivité (I_s) permet d'évaluer l'efficacité de cette opération. Dans le cas du minerai de fer:

$$I_s = \frac{\text{Récupération hématite au concentré}}{(100\% - \text{Récupération hématite au concentré})} * \frac{\text{Récupération silice au rejet}}{(100\% - \text{Récupération silice au reget})}$$

Ainsi pour une récupération 100% de l'hématite au concentré et un rejet de 100% de la silice:

$$I_s = \infty$$

et pour une récupération parfaite (100%) sans séparation:

$I_s = 1$

on a construit des courbes représentant les indices de sélectivité en figure 11. En observant ces dernières, on constate une meilleure performance aux position 6 et 7 du couteau et aux angles de 15 et 17 degrés d'inclinaison de la planche.

2) Courbes de rendement métal en fonction du grade (figure 12).

Si l'on désire obtenir un bon rendement avec un grade élevé, l'angle d'inclinaison de la planche doit être ajusté à 17 degrés. De plus on obtient à cet angle moins de fluctuation du rendement métal par rapport au grade du concentré (% hématite). Il en résulte donc une récupération plus grande d'hématite à un grade donné.

2.2 Série d'expériences II

2.2.1 Alimentation (Tableau 2)(figure 13)

L'étude de la variance sur le pourcentage de solides à l'alimentation démontre à 95% de certitude qu'il n'y a pas de diminution de la densité de la pulpe. Ceci établit que les agitateurs dans le réservoir étaient assez puissants pour mélanger la pulpe et enrayer le problème de sédimentation. D'ailleurs, s'il y avait eu sédimentation on aurait observé une diminution de la teneur en fer de l'alimentation (voir essai 1). Or, l'analyse statistique de la teneur en fer tant calculée qu'analysée démontre que le modèle linéaire proposé correspond bien aux résultats. Comme la teneur en fer a augmenté légèrement avec l'échantillonnage au cours de cet essai, il y a donc contradiction apparente entre les résultats réels et ceux prévus. Nous devons donc logiquement émettre l'hypothèse que cet échantillonnage n'est pas suffisamment représentatif.

2.2.2 Concentré

Le comportement du concentré lors de cette série d'expériences diffère de celui observé précédemment (figure 14). On constate que la teneur en fer atteint un maximum aux positions 3 et 4 du couteau. Ce maximum s'établit à environ 48.5% Fe et il est indépendant de l'angle d'inclinaison de la planche. On note également qu'aux positions 1 et 2 du couteau, les teneurs et quantités recueillies au concentré diminuent par rapport à celles aux positions 3 et 4 (figure 14).

2.2.3 Rejets

Le comportement du rejet apparait plus cohérent que celui du concentré (figure 16): les courbes sont généralement ascendantes. De plus, les teneurs en fer sont proches de celles de l'alimentation aux positions 7 et 8 du couteau, d'où un plafonnement dans les courbes. D'autre part, contrairement aux observations précédents (figure 8), nous avons maintenant une famille de courbes en fonction de l'angle d'inclinaison (figure 16). Un tel comportement peut s'expliquer par l'augmentation de la teneur en fer à l'alimentation, que le modèle statistique avait préalablement établi.

2.2.4 Rendements

Le rendement fer calculé algébriquement pour la série d'expériences sur la dilution est erratique, car la teneur en fer de l'alimentation est parfois plus faible que celle du rejet.

D'autre part, le rendement calculé arithmétiquement est plus réaliste. La relation entre ce rendement et la position du couteau y est liréaire (figure 17). Bien que les différentes courbes soient très rapprochées les unes des autres, l'angle de 13,5 degrés donne visiblement des meilleurs résultats.

2.2.5 Comparaisons

1) Indice de sélectivité

La figure 18 représentant les indices de sélectivité confirme la tendance établie précédemment à la suite de l'analyse de la série I, c'est-à-dire on obtient de meilleurs résultats lorsque le couteau est placé aux positions extrêmes plutôt qu'en position médiane. Aux ajustements 7 et 8 et avec un angle de 17 degrés, on obtient alors un maximum d'efficacité.

2) Courbes de rendement fer en fonction du grade

Celles-ci ont une allure de U penché (figure 19) avec une limite maximale de 71% Fe_2O_3 atteinte à 60% de rendement. Une telle relation ne permet pas de définir les conditions optimales d'opération aussi facilement que lors des premiers essais (figure 12).

En dernière analyse, on peut conclure qu'une augmentation du pourcentage de solides dans la pulpe d'alimentation a un effet positif sur l'efficacité du sluice pour traiter le minerai de fer, tout en diminuant les coûts d'opérations.

2.3 Série d'expériences sur le charbon (Tableau 3)

2.3.1 Alimentation

L'analyse statistique des données recueillies sur le pourcentage de solides dans l'alimentation nous indique que le modèle linéaire est acceptable avec 95% de certitude. Ceci veut donc dire que la pulpe s'appauvrit en solides au cours de l'échantillonnage. Durant cet essai, un seul agitateur était utilisé dans le réservoir. Il a donc pu s'avérer inefficace pour bien mélanger la pulpe.

L'étude statistique nous démontre d'autre part que la variation de la teneur en cendres à l'alimentation (taut calculée qu'analysée) ne suit pas une régression linéaire simple (figure 20). Nous avons donc pris pour acquis que la teneur en cendres était constante avec 95% de certitude. Il appert par observation de la figure 20 que les courbes de teneur en cendres calculées et analysées semblent suivre un patron similaire de variation. Le décalage des deux courbes peut facilement s'expliquer par une fuite observée pendant la durée de l'essai. En effet, un jet blanchâtre provenant de la spirale tombait directement dans l'échantillonneur d'alimentation sans passer par celui des produits. Il est probable que cette eau contenait une quantité importante de cendres (fines), d'où une alimentation enrichie à l'échantillonnage.

2.3.2 Concentré et rejets

La relation entre les teneurs des produits (concentré et rejet) et leurs poids respectifs apparait aux figures 21 et 22. Les analyses ne démontrent aucune corrélation entre les produits obtenus à la suite des divers essais à inclinaison variable du sluice.

2.3.3 Rendements

Les figures 23 et 24 illustrent la récupération en charbon (yield) et le rejet des minéraux non voulus (cendres) en fonction de la position du couteau. La relation est quasi linéaire et la distinction est nette entre les angles d'inclinaison étudiés.

2.3.4 Comparaisons

1) Indice de sélectivité (figure 25)

Bien que l'indice de sélectivité n'accuse aucune tendance manisfeste en fonction des angles d'inclinaison du sluice, un angle de 7 degrés a donné les meilleurs séparations quelque soit la position du couteau.

2) Courbes de rendement en fonction du pourcentage de charbon (figure 26)

La relation entre le rendement et la qualité de charbon n'apparait pas significative aux conditions étudiées (figure 26). On ne peut distinguer un angle d'opération optimal à cet égard. L'angle de 7 degrés, le meilleur quant à l'indice de sélectivité, ne s'avère pas supérieur aux autres angles d'inclinaison étudiés.

2.3.5 Fractions granulométriques (tableau 4 et figure 27)

Pour vérifier si l'efficacité du sluice différait en fonction de la granulometrie, nous avons tamisé et analysé les produits obtenus dans les tests 3 et 7 combinées (la quantité recueillie étant insuffisante pour faire des études séparées). La figure 27 nous montre qu'effectivement les teneurs en cendres au concentré et au rejet sont plus favorables pour les plus 60 mailles que pour les moins 100 mailles. Alors que l'indice de sélectivité nous indique aucune préférence entre ces classes granulométriques, le produit algébrique du rendement du charbon (yield) par sa teneur confirme cependant la plus grande efficacité du sluice avec le plus de 60 mailles.

2.3.6 Étude de la spirale

Comme un seul essai a été effectué et que les quantités de produits recueillis étaient faibles, aucune étude dans les classes granulométriques n'a été faite. Cependant l'analyse globale des produits (tableau 5) indique qu'il y a une séparation effective des cendres et du charbon dans les divers produits.

CONCLUSION

Cette étude porta essentiellement sur l'ébauchage de minerai au moyen du sluice. Tous les essais ont été effectués avec une alimentation en circuit fermé. A la suite de nos travaux, il n'est donc pas possible de prédire avec précision l'efficacité d'un ensemble de sluices tel que l'on retrouve sur le marché. Certaines extrapolations sont cependant possibles.

Les essais sur le minerai de fer ont établi que la qualité du concentré s'améliore avec l'angle d'inclinaison de la planche, mais que la récupération en fer diminue en même temps. Ainsi, pour un angle d'inclinaison de 18 degrés de la planche et une position 1 du couteau, la teneur du concentré a atteint son maximum pour toute l'étude soit 56,60% Fe.

La récupération en fer n'était alors que de 41,4%. Avec l'angle de 17 degrés cependant, 68,1% du fer fut récupéré avec une teneur au concentré de 55,06%.

Le sluice fonctionne mieux aux positions extrêmes du couteau, c.à.d. lorsqu'on récupère peu de concentré à une teneur élevée en fer ou lorsqu'on rejette peu de matériel à basse teneur.

Les meilleures performances globales (rendement et grade) sur le minerai de fer étaient atteintes avec un angle d'inclinaison de 17 degrés et des positions extrèmes du couteau, de même que pour les pulpes denses à 30% et 65% solides. Toutefois, les performances expérimentales du sluice avec une pulpe à 65% solide ont apparu plus cohérentes que lors des essais à 30% solide. Ainsi, la relation teneur au concentré versus position du couteau est mieux définie avec une pulpe à 65% solide.

Nous pouvons donc conclure que le sluice est plus performant à 65% solide, tant pour le rendement que pour la teneur en fer du concentré.

Les essais sur le lavage du charbon ne furent pas des plus concluants. Les performances du sluice (rendement et teneur en cendres au concentré) furent inadéquates aux angles étudiés. De plus, le relation entre la teneur en cendres au concentré et aux rejets en fonction de la position du couteau n'a pas été constante pour les divers angles étudées. Les quantités de pulpe recueillies lors de l'échantillonnage étaient faibles, ce qui peut expliquer l'incohérence et l'inefficacité apparente de certains résultats.

REMERCIEMENTS

L'auteur tient à remercier M. Raymond Dallaire, professeur à l'école Polytechnique, pour la supervision générale du travail, et M. Gilles Mathieu, chercheur scientifique, pour ses commentaires relatifs à cette étude.

ANNEXE A

RÉSULTATS ET FIGURES
Série d'expériences I

Tableau 1 - Résultats d'analyses pour le minerai de fer à 65% solide

Essai #	Inclin. degrés	Position couteau	Alimentation			Concentré			Rejets		Rendements			
			%Fer analysée	%Fer calculée	%Sol.	Poids (g)	%Fer	Grade* (%Fe_2O_3)	Poids (g)	%Fer	Fer (algébrique)	Fer (arithmétique)	Silice	Indice sélectivité
1	17	2	45,14	45,17	64,0	163,9	53,61	76,7	88,1	29,48	77,1	77,2	57,1	1,02
2		4	44,48	45,25	64,0	184,3	50,86	72,7	42,6	20,97	89,9	91,3	37,2	1,02
3		6	44,10	45,33	63,9	213,2	47,84	68,4	17,7	15,04	96,1	97,5	17,1	1,04
4		1	44,68	44,37	63,6	124,9	55,06	78,7	102,7	31,37	69,2	68,1	68,1	1,01
5		3	44,65	44,61	63,9	174,1	52,23	74,7	64,2	23,95	85,6	85,5	48,9	1,02
6		5	45,05	45,26	62,7	201,8	49,59	70,9	32,5	18,36	94,1	94,4	29,0	1,02
7		7	45,44	44,48	62,9	230,9	46,77	66,9	18,9	16,53	98,4	97,2	15,9	1,04
8	15	1	44,91	43,26	62,7	120,6	54,10	77,4	116,4	32,03	70,3	63,6	69,8	1,02
9		3	42,76	43,00	60,0	167,7	50,72	72,5	67,9	23,94	83,4	84,0	49,2	1,02
10		5	44,02	43,30	61,4	189,8	48,04	68,7	38,8	20,11	93,4	92,1	31,8	1,02
11		7	43,14	43,84	60,8	209,6	45,29	64,8	10,0	13,51	97,9	98,6	9,9	1,06
12	18	1	42,57	44,96	60,2	76,7	56,60	80,9	156,5	39,25	25,4	41,4	82,4	1,02
13		3	44,06	42,87	61,4	118,2	53,06	75,9	103,4	31,23	70,8	66,0	66,7	1,02
14		5	43,15	43,20	60,0	165,0	50,11	71,7	61,7	24,73	84,3	84,4	46,0	1,02
15		7	43,14	42,59	60,3	193,0	47,16	67,4	37,5	19,08	93,7	92,7	30,3	1,02
16	21	1	42,68	42,45	59,2	53,4	52,01	74,4	156,6	39,19	33,2	31,2	83,4	1,02
17		3	43,41	42,08	59,1	92,2	51,67	73,9	132,5	35,40	58,6	50,4	73,1	1,02
18		5	42,59	41,96	59,3	131,1	50,62	72,4	107,2	31,37	69,3	66,4	62,0	1,02
19		7	43,45	41,95	59,4	170,2	48,60	69,5	60,4	23,21	89,2	85,5	43,7	1,02

* Grade: hématite pure = 1,43 x %fer

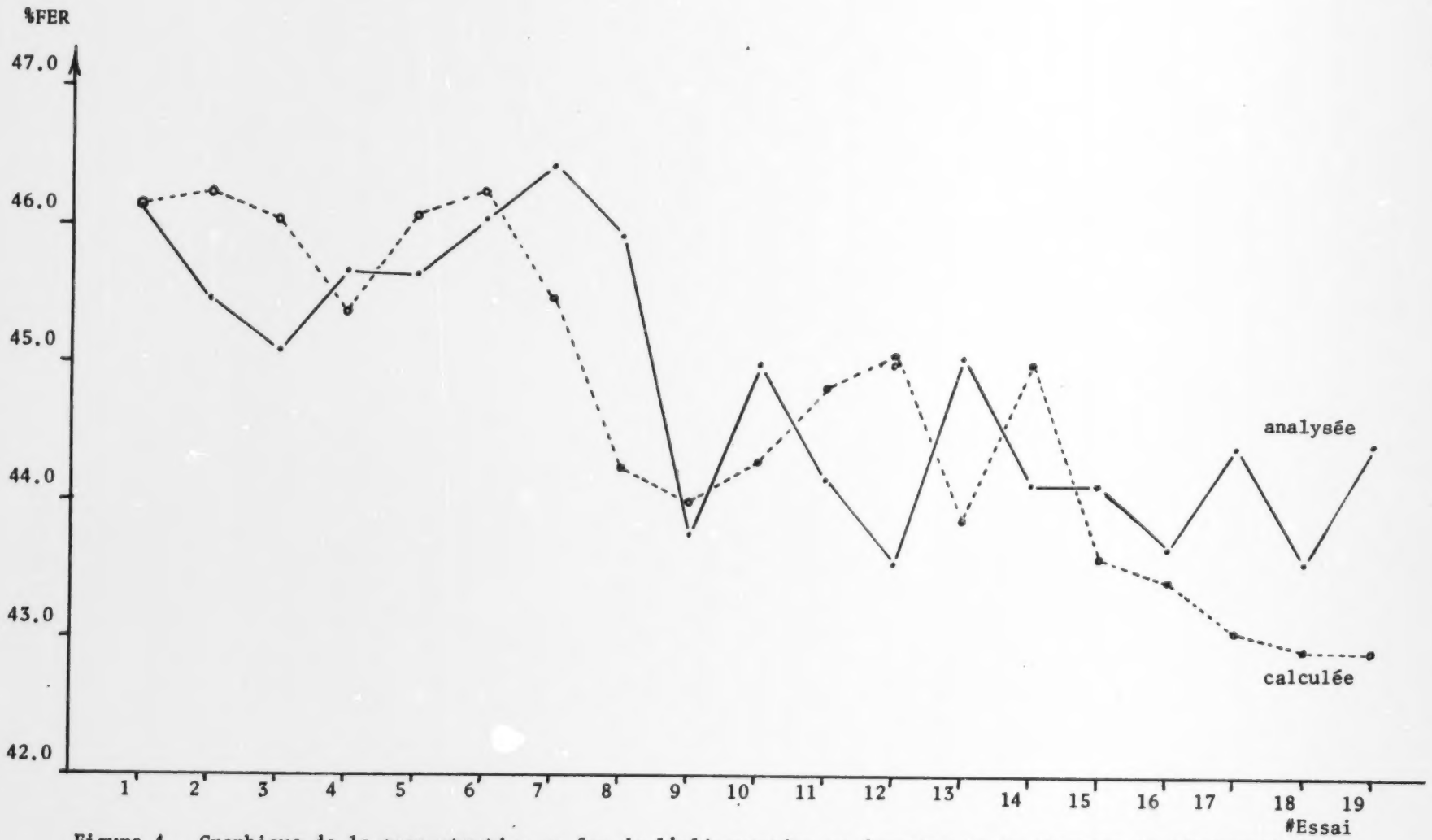

Figure 4. Graphique de la concentration en fer de l'alimentation en fonction de la séquence de l'échantillonnage.

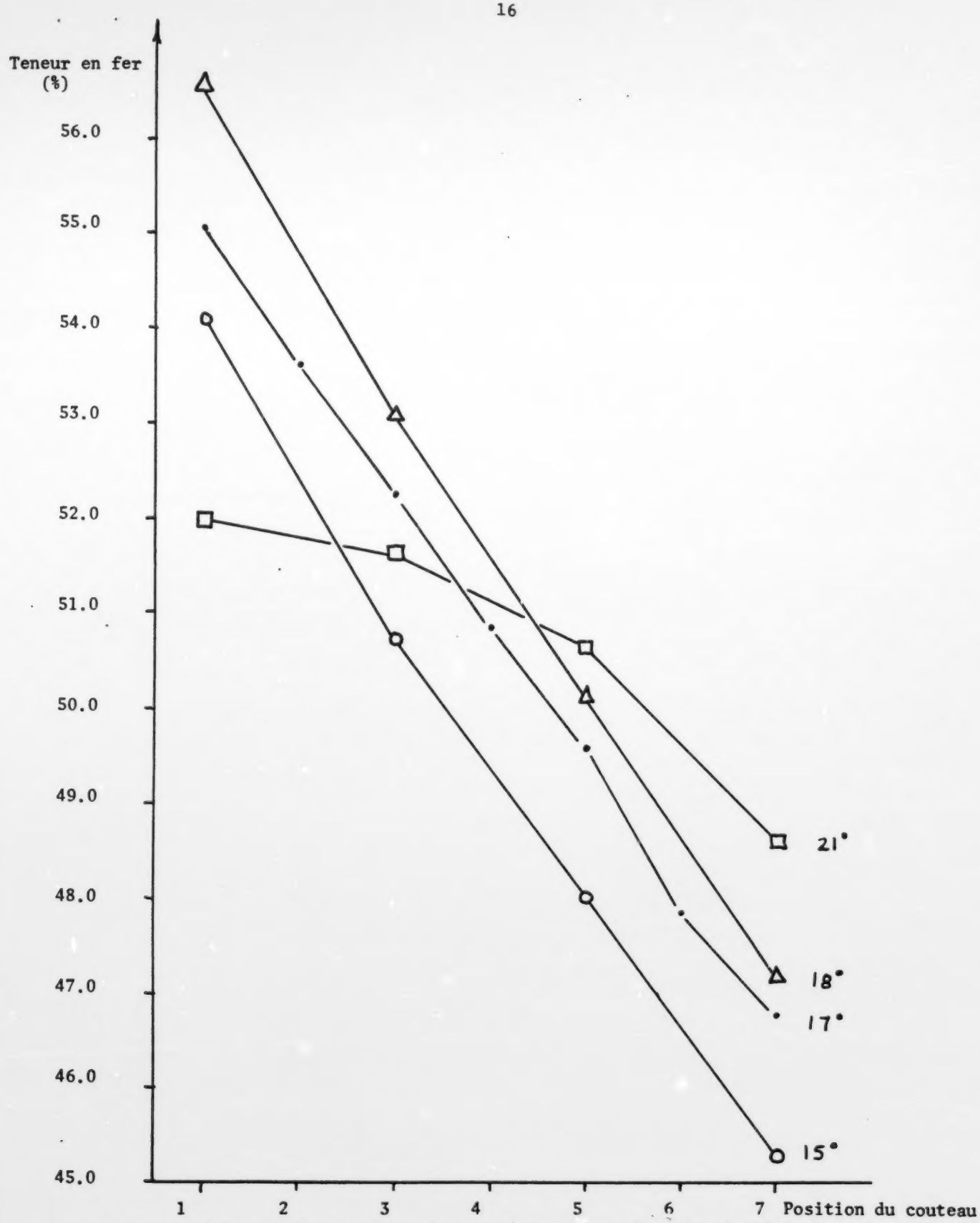

Figure 5. Graphique de la teneur en fer du concentré en fonction de l'ajustement du couteau.
Chaque courbe correspond à un angle d'inclinaison de la planche.

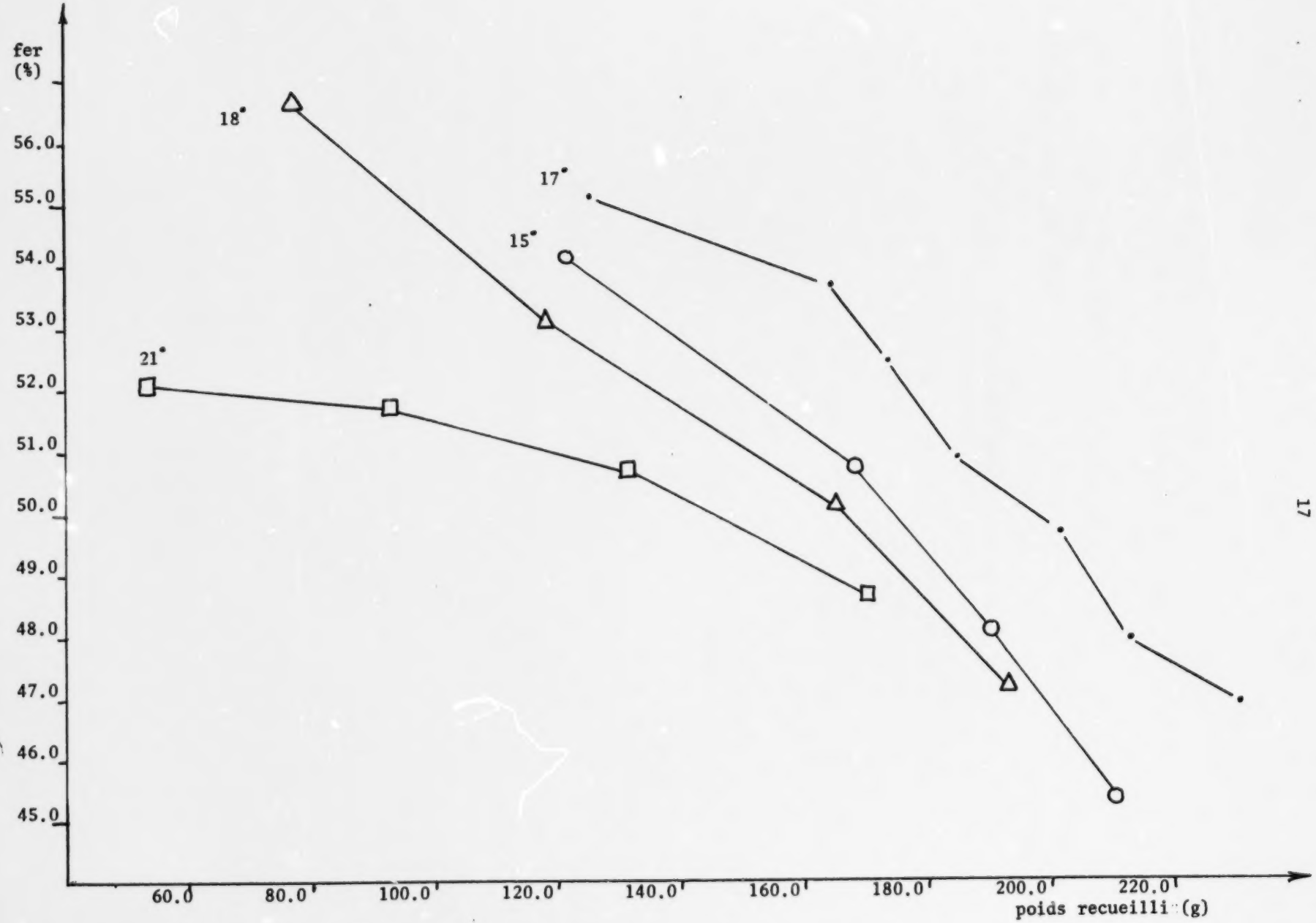

Figure 6. Courbes de la teneur en fer du concentré en fonction de son poids récupéré. Chaque courbe correspond à un angle d'inclinaison de la planche.

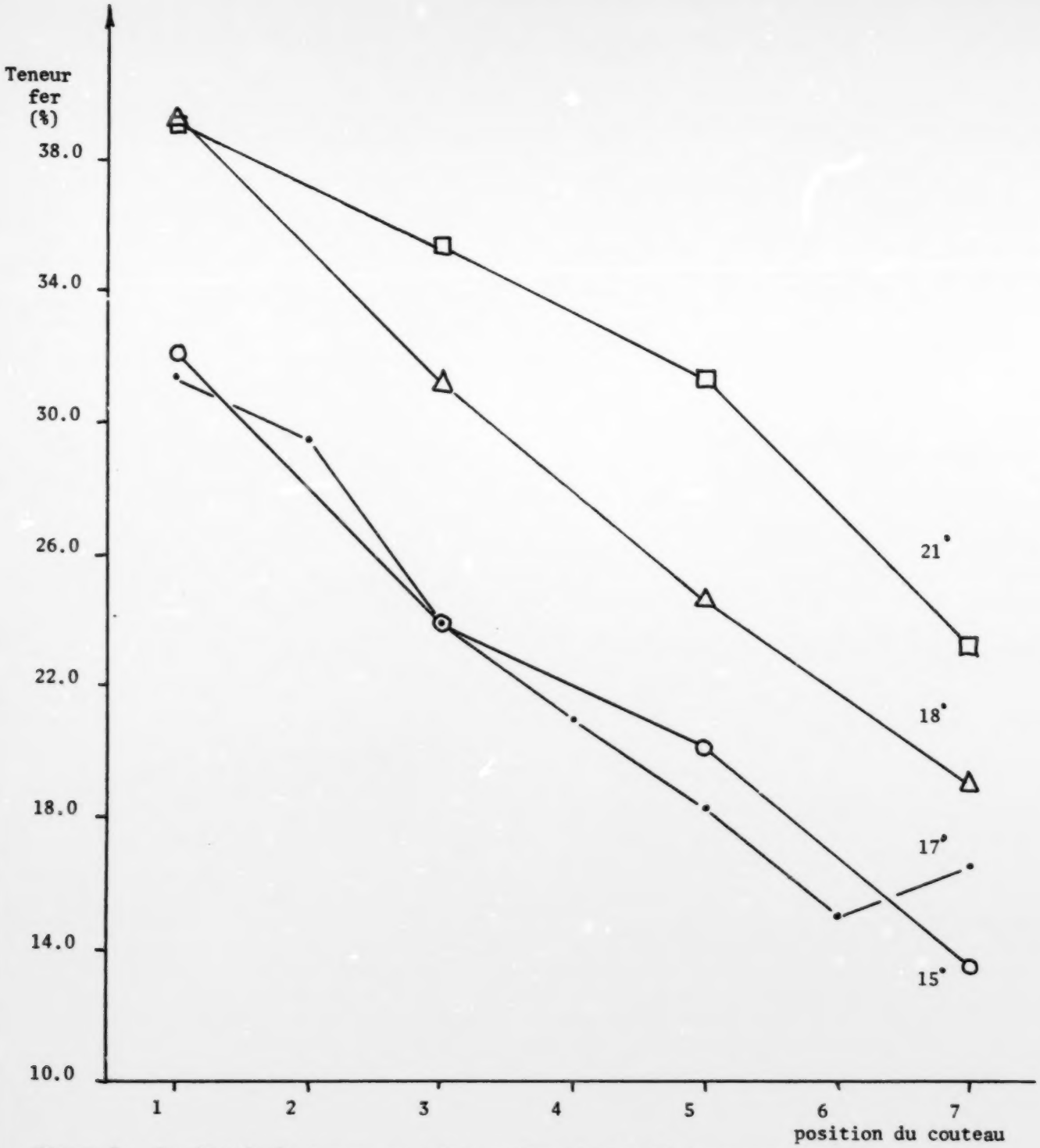

Figure 7. Courbes de la teneur au rejet en fonction de l'ajustement du couteau. Chaque courbe correspond à un angle d'inclinaison de la planche.

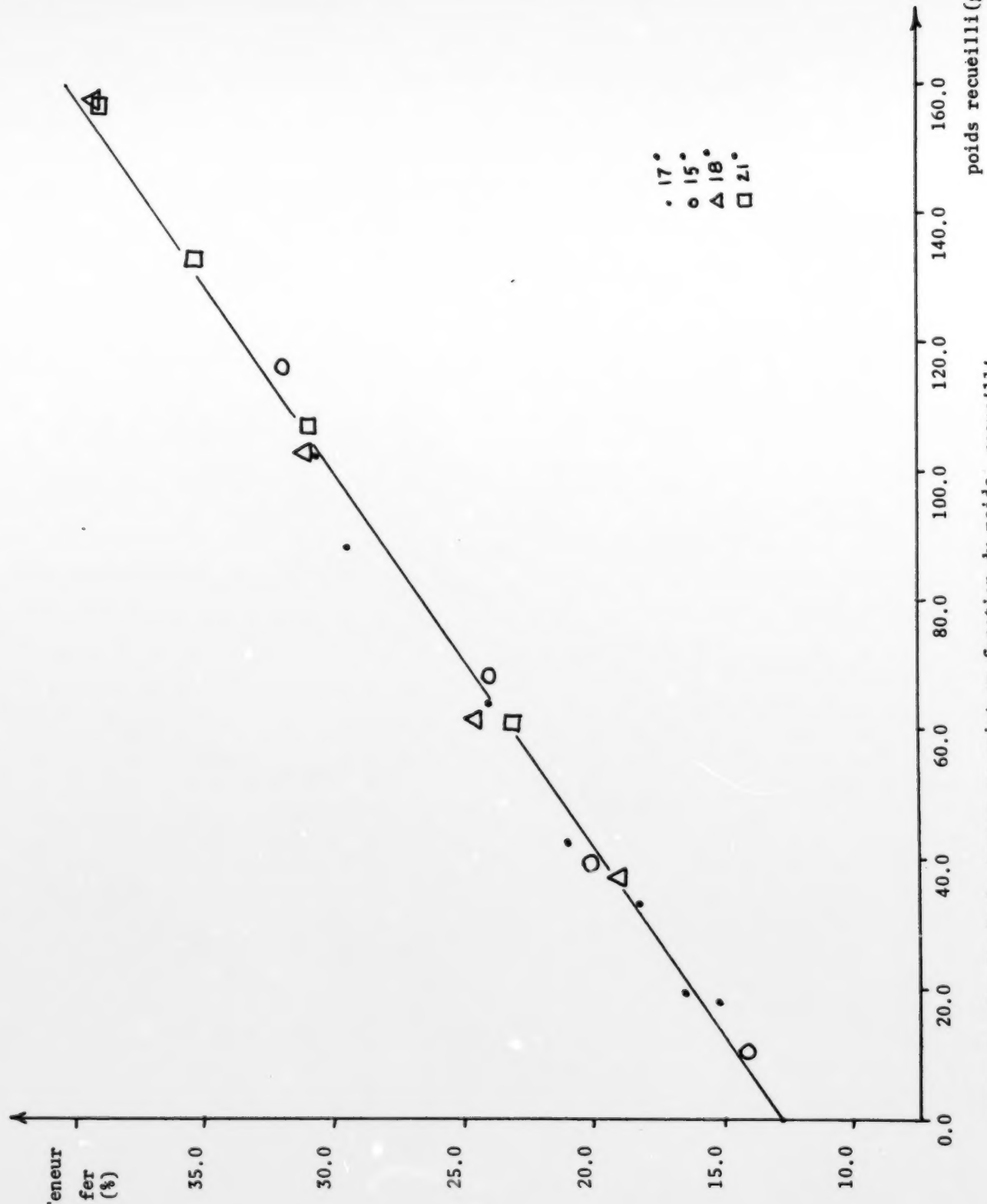

Figure 8. Courbe de la teneur au rejet en fonction du poids recueilli

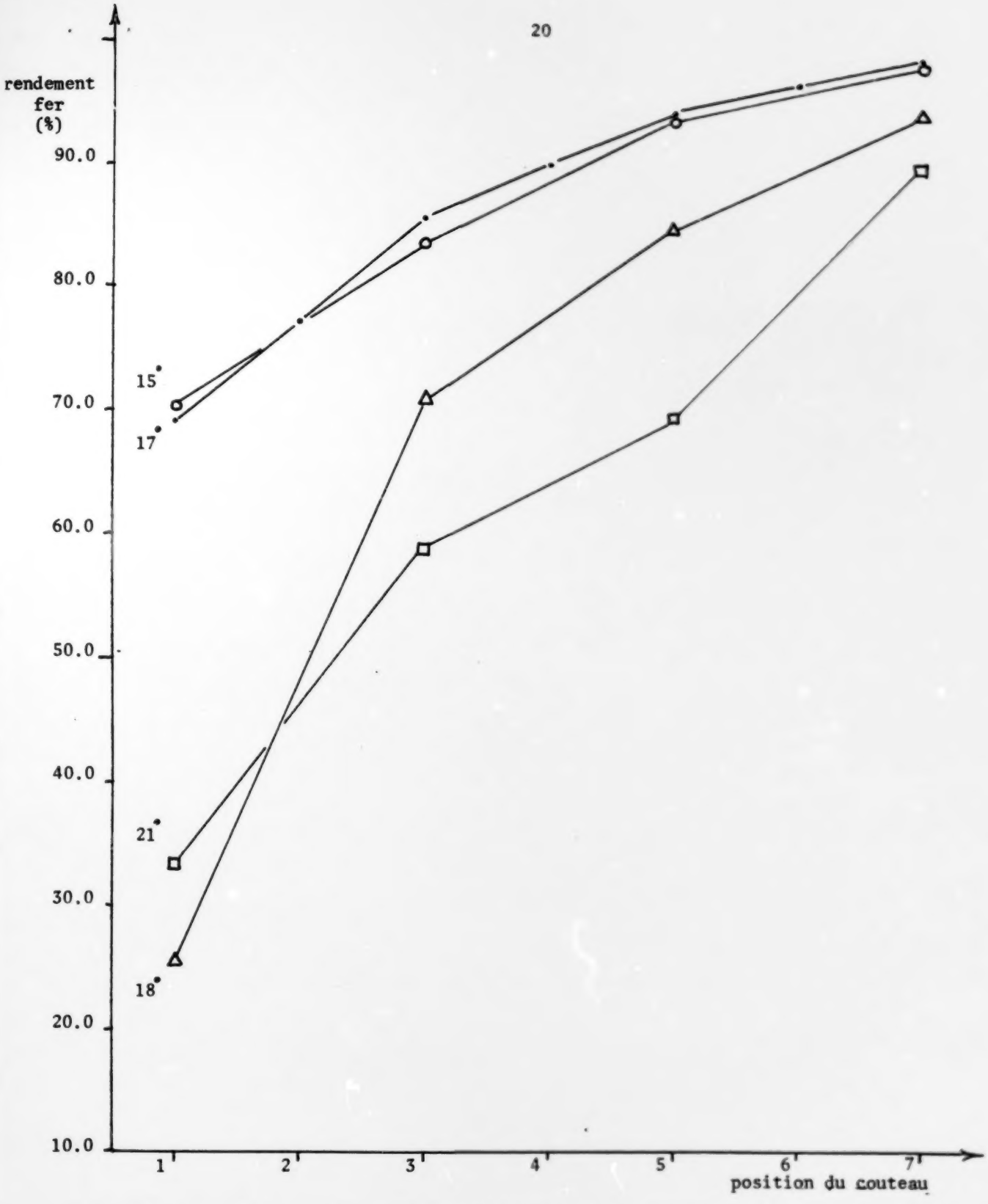

Figure 9. Courbes de rendement du fer (algébrique) en fonction de l'ajustement du couteau.
Chaque courbe correspond à un angle d'inclinaison de la planche.

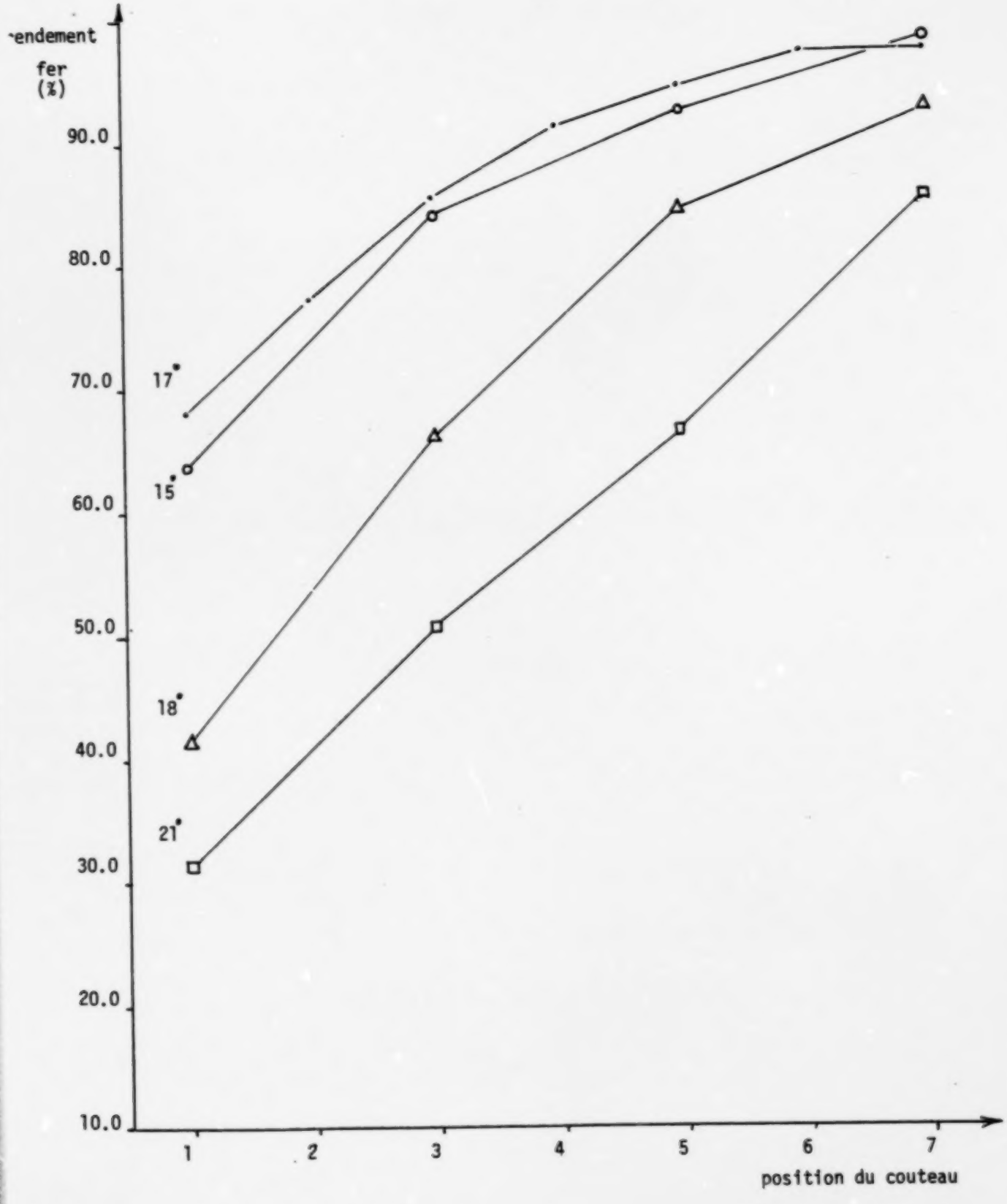

Figure 10. Courbes de rendement du fer (2 produits) en fonction de l'ajustement du couteau.

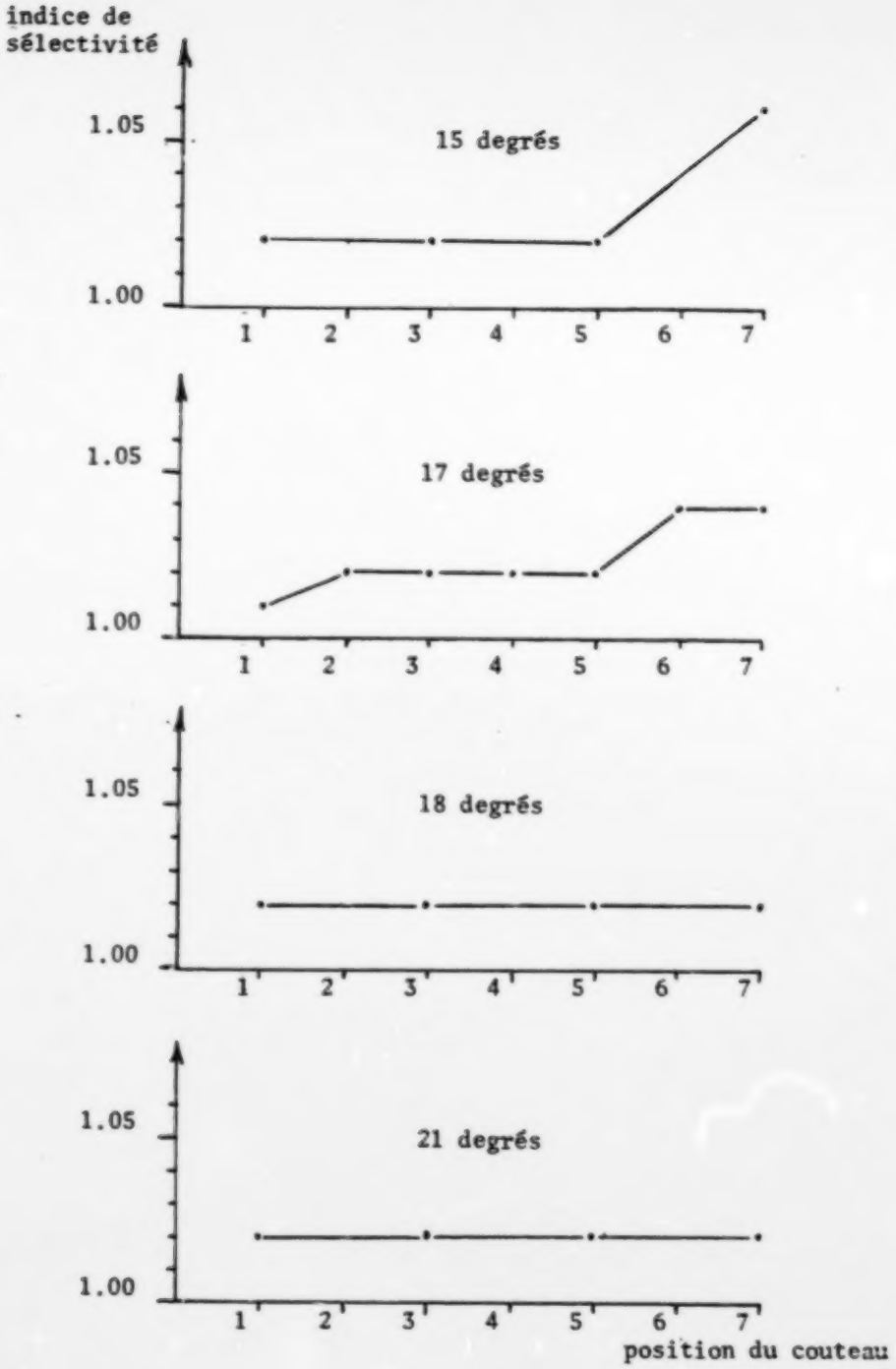

Figure 11. Courbes comparatives des indices de sélectivité en fonction de l'ajustment du couteau et des angles d'inclinaison de la planche.

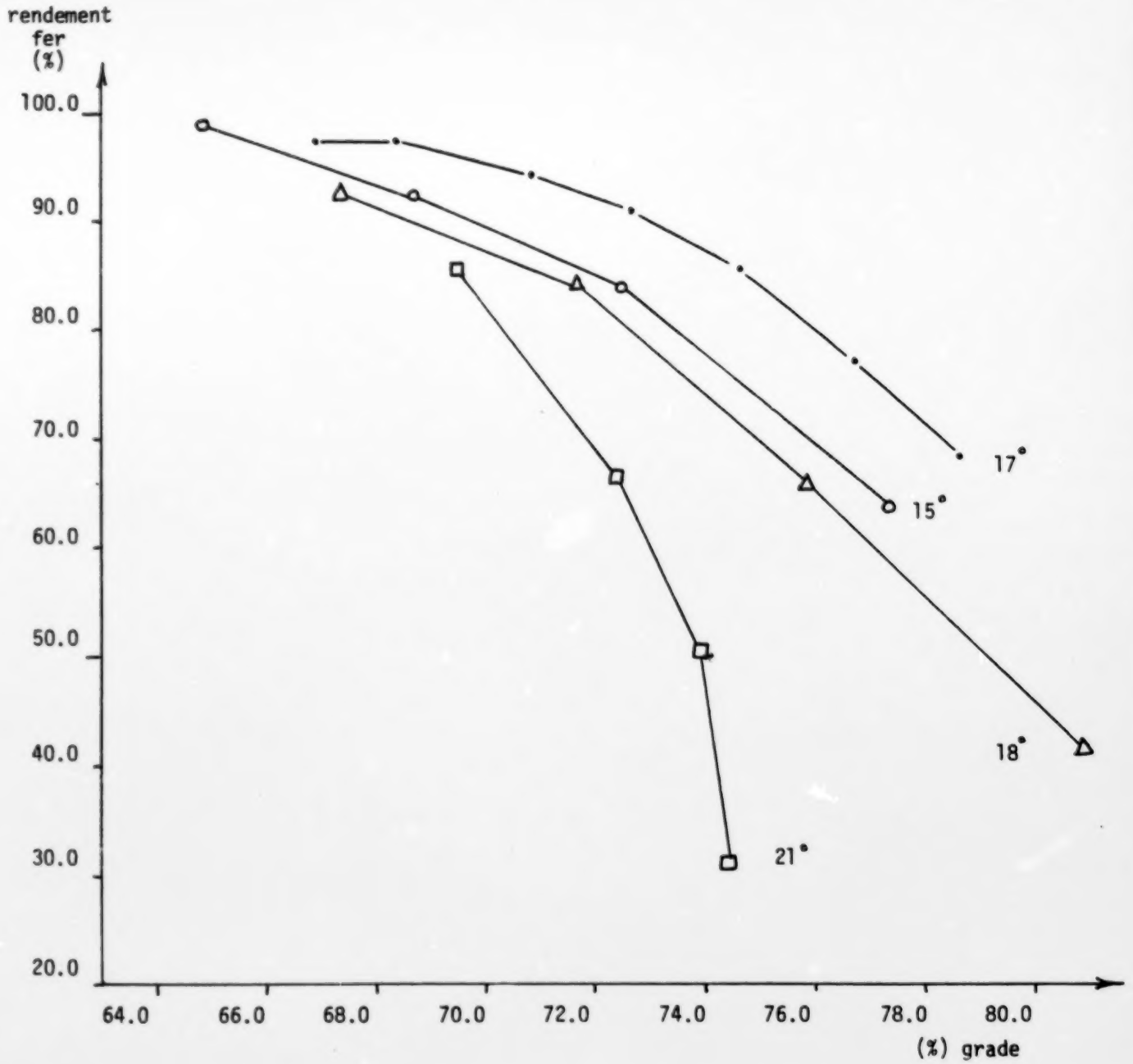

Figure 12. Courbes du rendement en fer (arithmétique) en fonction du grade.

ANNEXE B

RÉSULTATS ET FIGURES
Série d'expériences II

Tableau 2 - Résultats d'analyses pour le minerai de fer à 30% solides

Essai #	Inclin. degrés	Position couteau	Alimentation			Concentré			Rejets		Rendements		Silice arithmétique	Indice sélectivité
			%Fer analysée	%Fer calculée	%Sol.	Poids (g)	%Fer	Grade* $\%Fe_2O_3$	Poids (g)	%Fer	Fer (algébrique)	Fer (arithmétique)		
1	13.5	1	43,46	43,66	30,0	23,7	48,61	60,1	71,5	42,02	24,4	27,7	69,5	1,02
2		3	42,58	44,61	29,8	44,6	49,59	56,0	40,9	39,18	38,0	58,0	70,9	1,02
3		5	42,62	44,35	29,7	63,2	47,13	52,7	23,5	36,88	61,9	77,5	67,4	1,02
4		7	44,07	45,23	30,5	73,1	47,01	47,3	10,7	33,06	84,2	90,7	67,2	1,03
5	15	1	41,48	42,09	28,9	17,4	47,12	58,2	63,7	40,71	13,7	24,0	67,4	1,03
6		3	44,23	38,76	29,1	33,6	49,35	55,4	44,5	38,76	57,6	49,0	70,6	1,02
7		5	44,00	46,36	29,4	62,1	48,51	57,9	22,7	40,48	48,3	76,6	69,4	1,02
8		7	42,52	45,39	28,3	71,3	47,06	51,3	12,5	35,86	65,8	88,2	67,3	1,03
9	17	1	42,26	43,56	30,1	16,2	46,22	61,3	62,9	42,88	----	21,7	66,1	1,03
10		3	41,94	45,13	29,1	32,0	49,19	60,9	50,9	42,58	----	42,1	70,3	1,02
11		5	44,03	44,14	28,5	48,8	47,07	56,7	32,0	39,67	63,0	64,4	67,3	1,02
12		7	43,10	43,95	28,5	70,3	45,43	50,6	12,1	35,36	81,0	88,2	65,0	1,03
13		2	42,77	44,14	28,6	24,1	47,64	60,9	55,0	42,60	3,8	32,8	68,1	1,02
14		4	43,24	44,34	29,2	36,6	48,40	58,2	40,6	40,68	37,1	51,8	69,2	1,02
15		6	44,43	44,46	29,5	58,1	46,45	55,3	20,1	38,71	77,3	77,6	66,4	1,02
16		8	44,84	44,61	29,0	70,1	45,67	48,4	6,9	33,87	94,7	93,2	65,3	1,05
17	18	1	45,12	43,13	27,4	10,5	46,74	60,8	65,1	42,53	63,7	15,1	66,8	1,04
18		3	43,54	45,38	28,4	32,4	49,36	60,6	43,0	42,36	19,1	46,8	70,6	1,02
19		5	44,34	45,54	28,9	48,0	48,87	57,8	31,3	40,44	51,0	65,0	69,9	1,02
20		7	42,48	45,74	29,0	61,4	48,17	51,3	15,1	35,88	60,0	84,5	68,9	1,02
21	21	2	44,62	44,66	29,2	18,9	48,26	62,2	57,7	43,48	25,8	26,7	69,0	1,03
22		4	45,10	46,41	29,8	33,4	49,88	62,2	39,3	43,47	28,1	49,4	71,3	1,02
23		6	44,86	45,69	29,4	48,2	48,15	58,7	25,8	41,09	57,3	68,6	68,9	1,02
24		8	45,29	46,11	29,1	61,3	47,80	52,6	11,1	36,77	81,5	87,8	68,4	1,03

* Grade: hématite pure = 1,43 x %fer

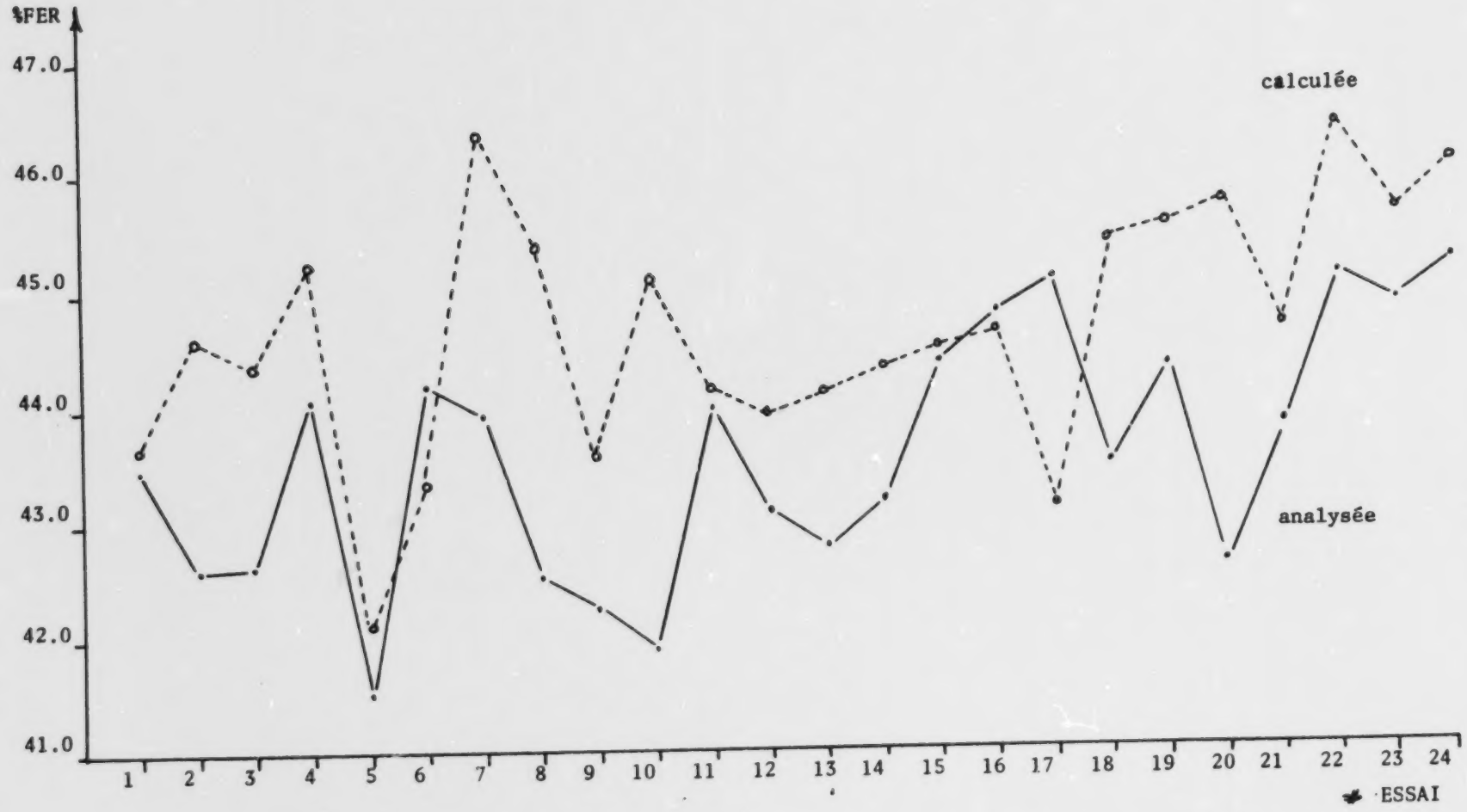

Figure 13. Graphique de la concentration en fer à l'alimentation en fonction de la séquence d'échantillonnage.

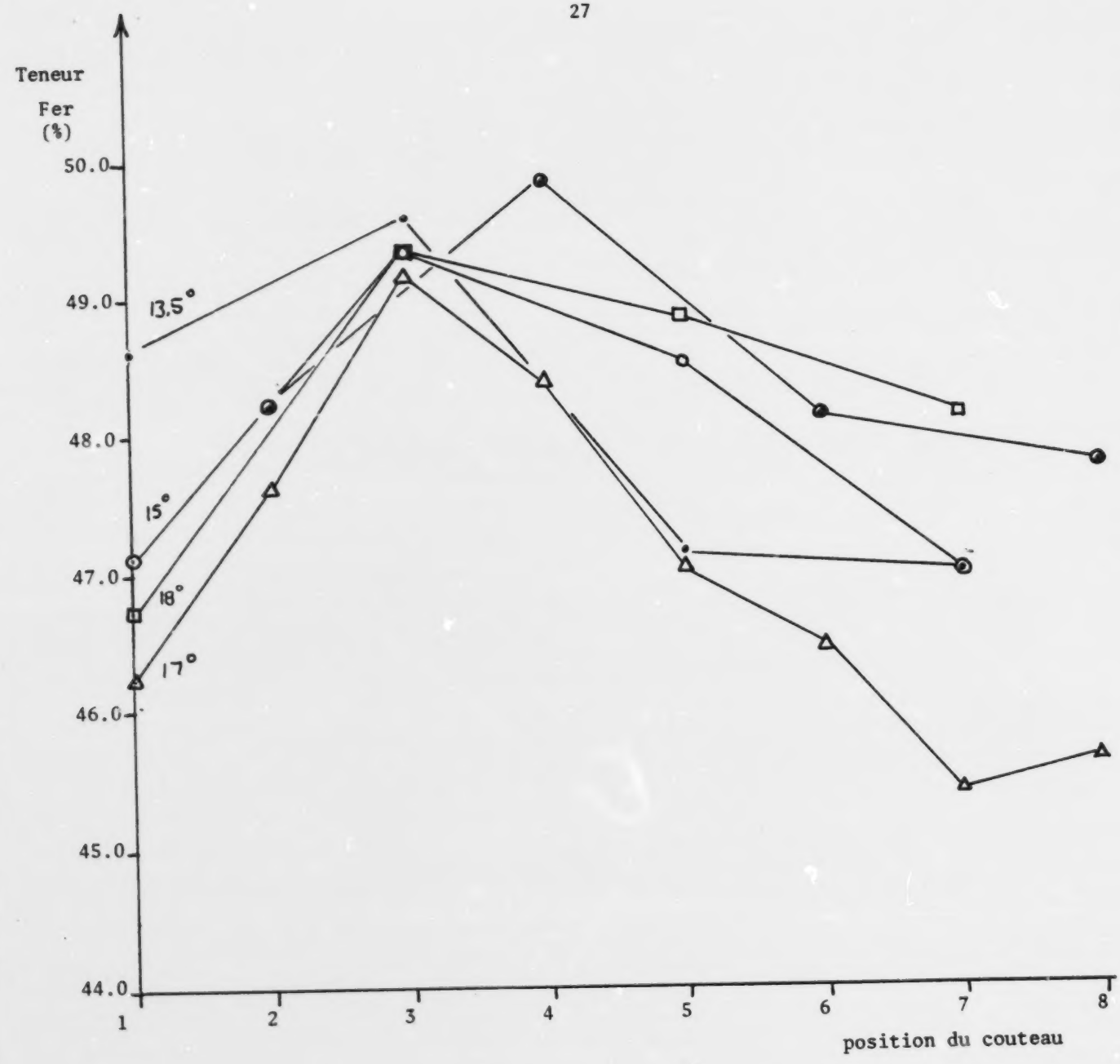

Figure 14. Graphique de la teneur en fer du concentré en fonction de l'ajustement du couteau.

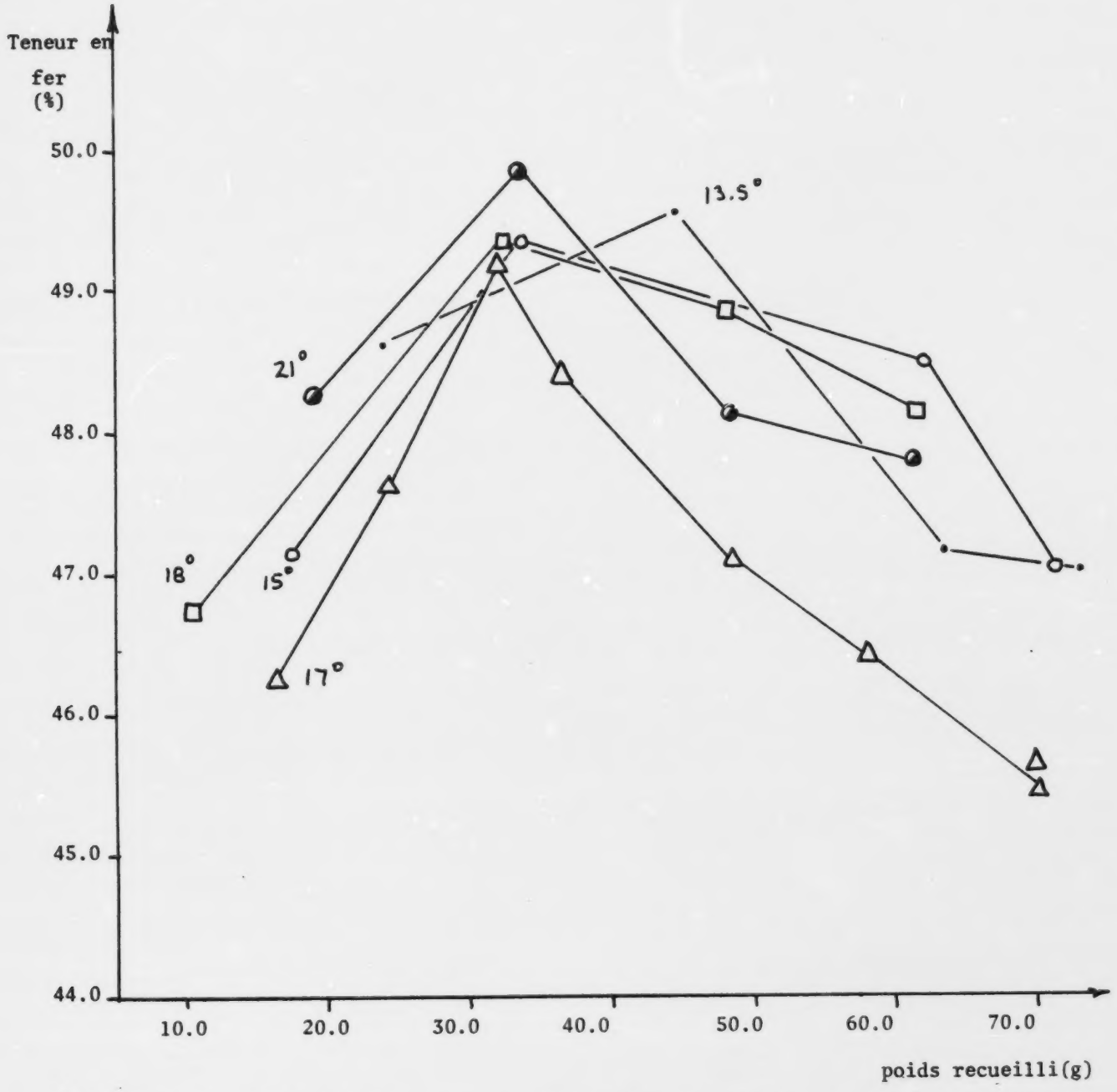

Figure 15. Courbes de la teneur en fer du concentré en fonction du poids recueilli. Chaque courbe correspond à un angle d'inclinaison de la planche.

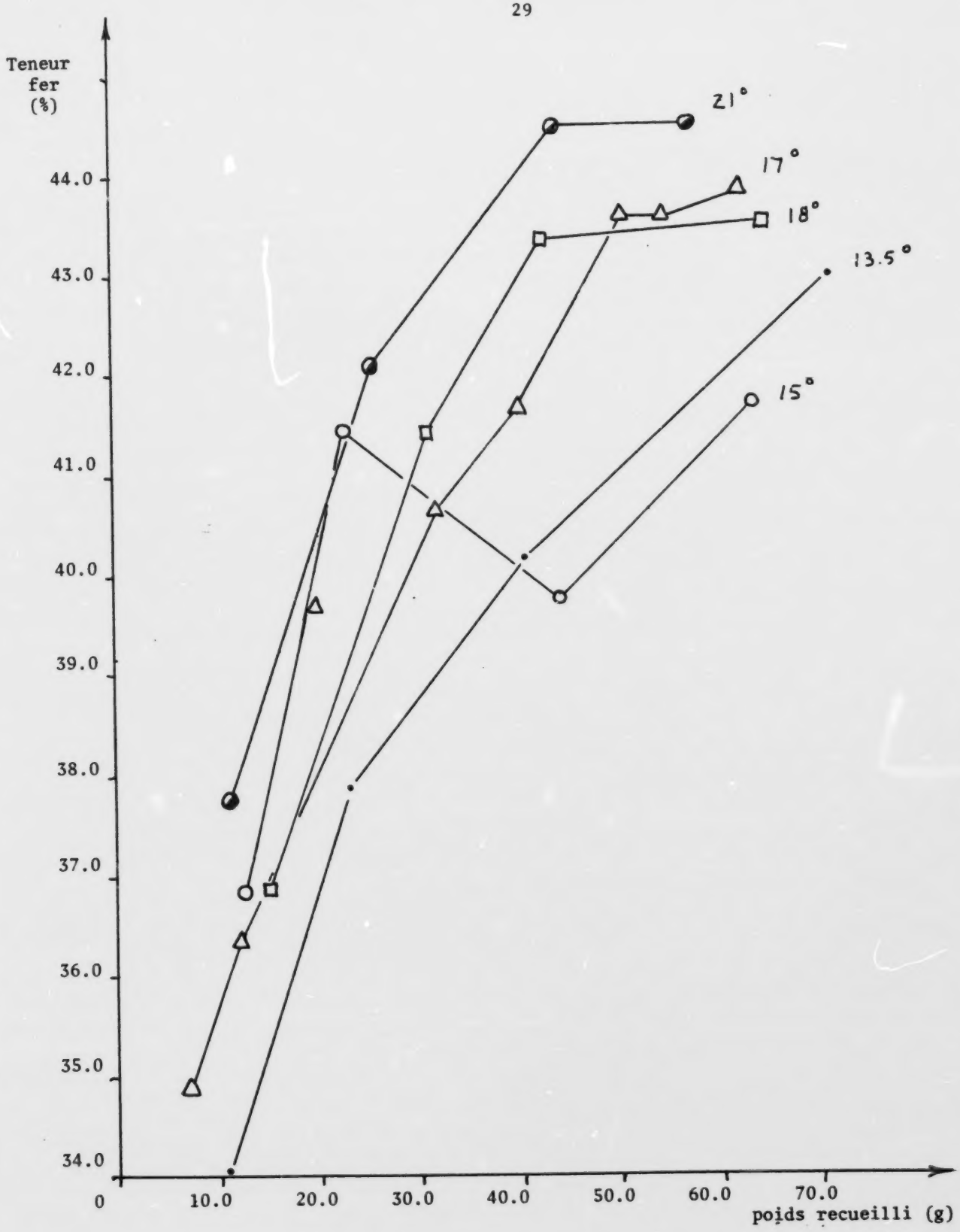

Figure 16. Courbe de la teneur en fer en fonction de son poids récupéré à divers angles d'inclinaison.

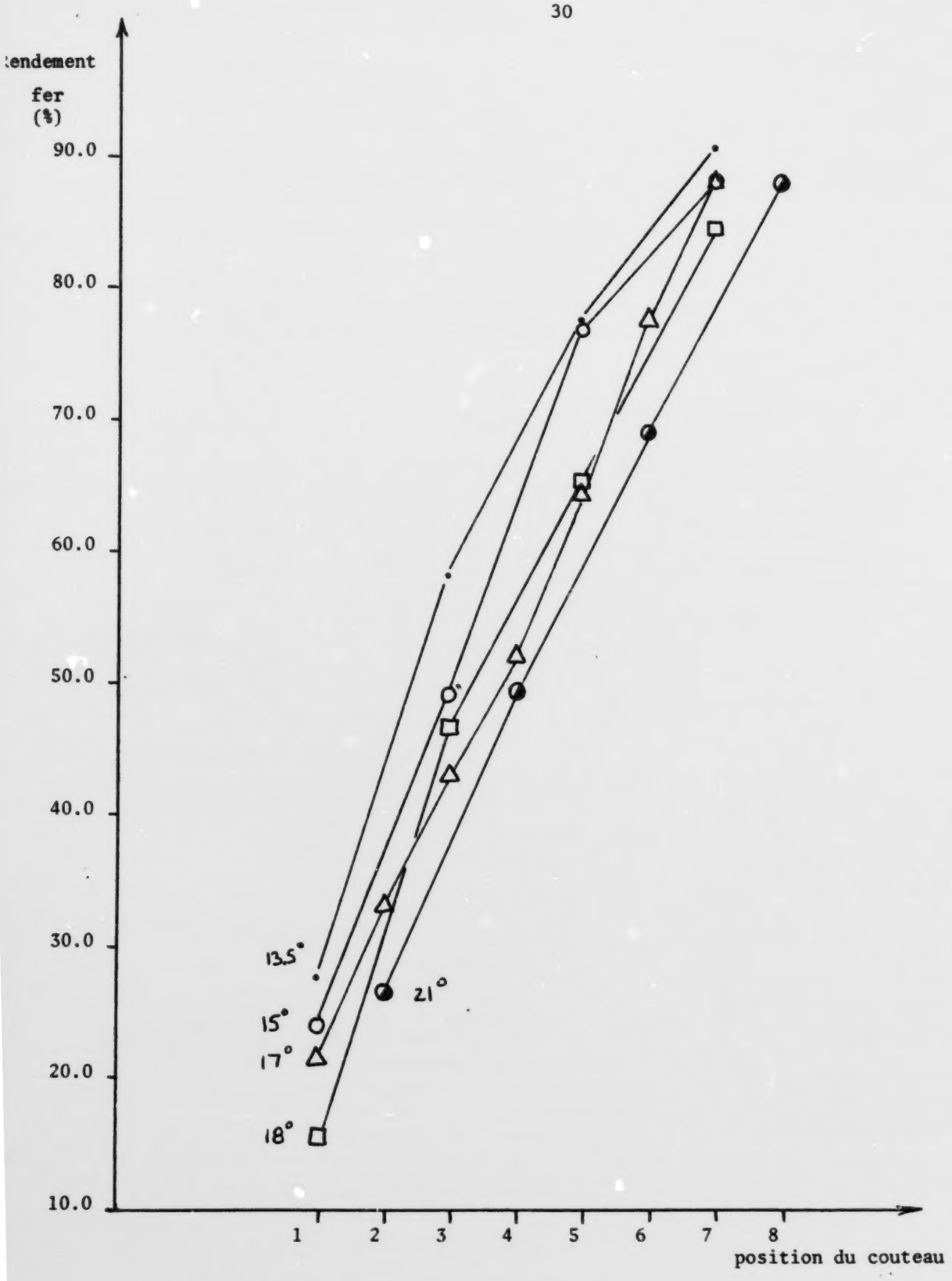

Figure 17. Courbes de rendement du fer (2 produits) en fonction de l'ajustement du couteau.

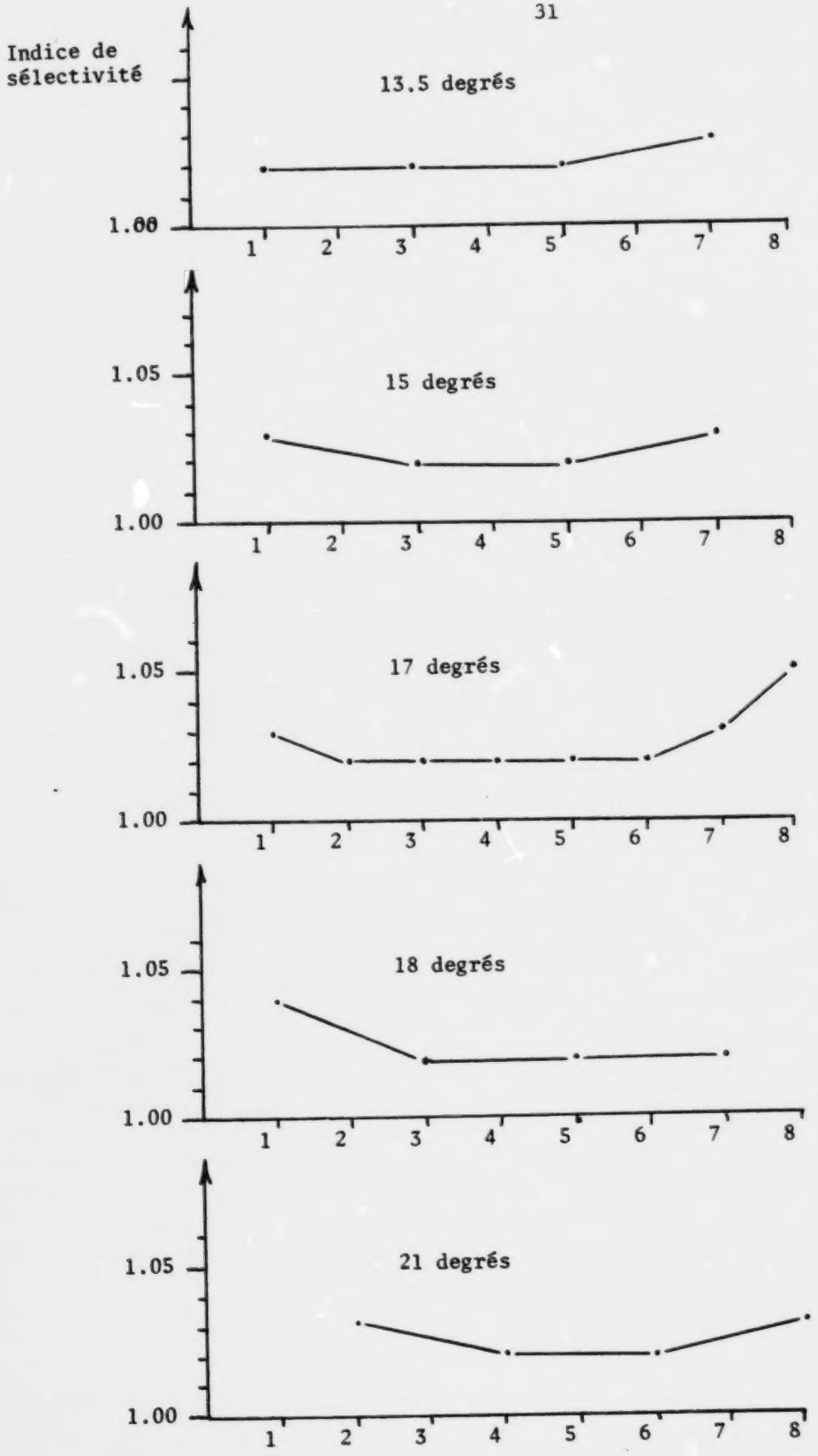

Figure 18. Courbes comparatives des indices de sélectivité en fonction de l'ajustement du couteau et des angles d'inclinaison.

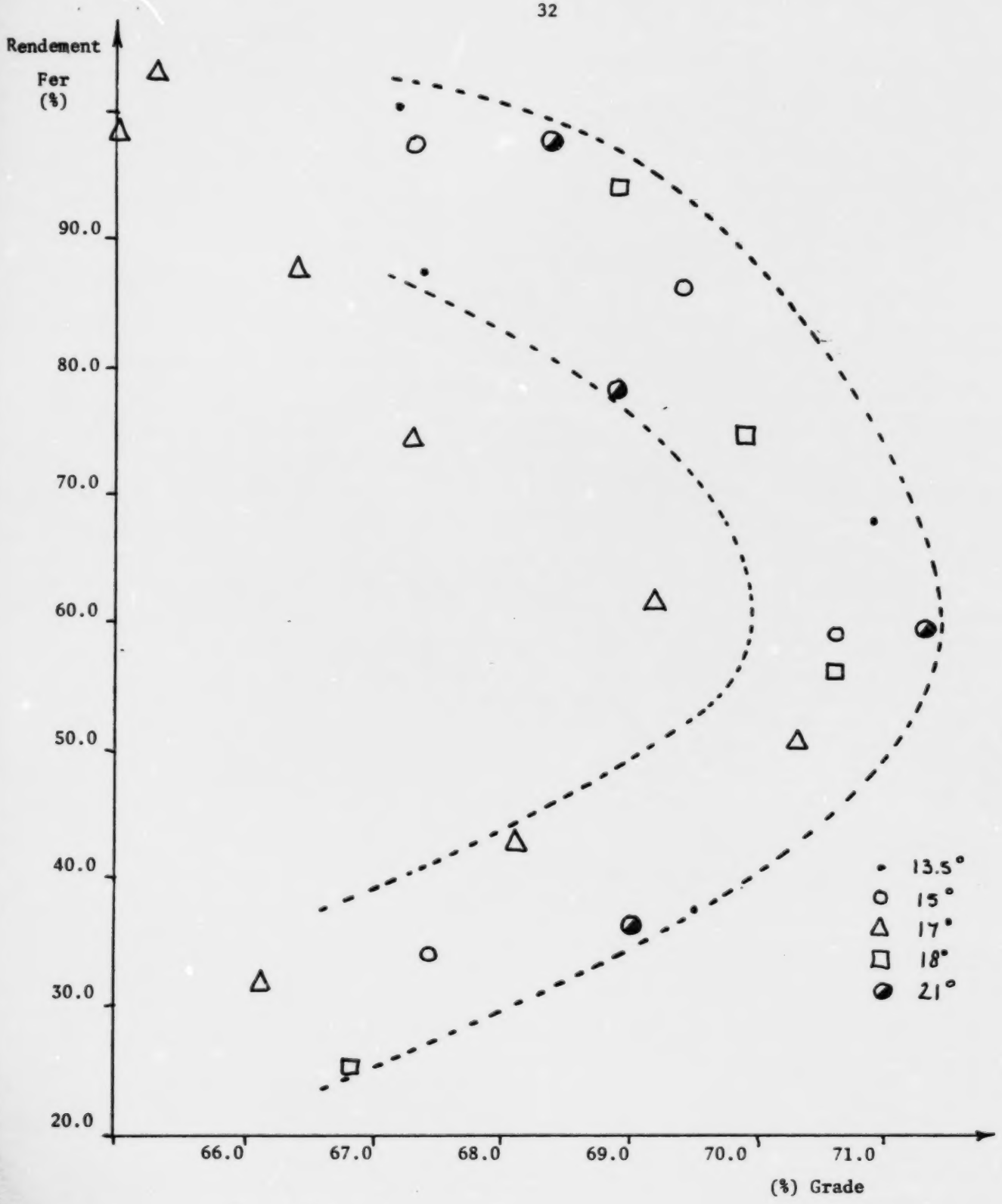

Figure 19. Courbes de rendement du fer (arithmétique) en fonction du grade.

ANNEXE C

RÉSULTATS ET FIGURES
Série d'expériences III

Tableau 3 - Résultats d'analyses pour la charbon à 20% solides

Essai #	Inclin. degrés	Position couteau	Alimentation			Concentré		Rejets		Rendements		Charbon rejets*	Indice sélectivité
			%Cendres analysée	%Cendres calculée	%Sol.	Poids (g)	%Cendres	Poids (g)	%Cendres	Cendres (arithmétique)	Cendres (algébrique)		
1	7	1	26,10	23,87	22,5	8,8	28,31	37,9	22,84	22,3	64,6	82,3	1,16
2		3	24,97	22,14	22,2	20,3	27,05	28,3	18,62	51,0	81,6	60,9	1,27
3		5	25,66	23,23	20,7	32,4	26,80	20,4	17,55	70,6	91,6	41,5	1,31
4		7	24,87	23,47	20,9	37,7	24,85	7,2	16,25	88,9	----	17,5	1,30
5	8.5	1	23,95	22,29	19,1	6,0	25,16	40,5	21,86	14,6	66,5	87,6	1,10
6		3	22,57	21,42	21,8	17,5	25,02	35,6	19,65	38,5	60,3	68,6	1,17
7		5	25,03	21,19	16,8	22,3	22,86	17,3	19,04	60,8	----	44,9	1,12
8		7	24,94	22,18	14,8	33,3	22,62	11,2	20,87	76,3	----	25,6	1,05
9	13.5	1	24,17	23,91	18,8	3,4	21,52	32,6	24,17	8,5	24,4	90,3	0,93
10		3	24,11	22,79	15,0	10,0	22,90	27,7	22,75	26,7	----	73,7	1,01
11		5	24,92	23,50	17,4	18,0	24,46	19,0	22,60	50,6	----	52,0	1,05
12		7	25,99	23,15	17,3	25,0	24,40	14,3	20,97	67,0	----	37,4	1,10
13		9	26,52	23,69	17,9	31,1	24,39	3,8	18,00	91,7	----	11,7	1,21

* la quantité de charbon exempt de cendres se retrouvant aux rejets

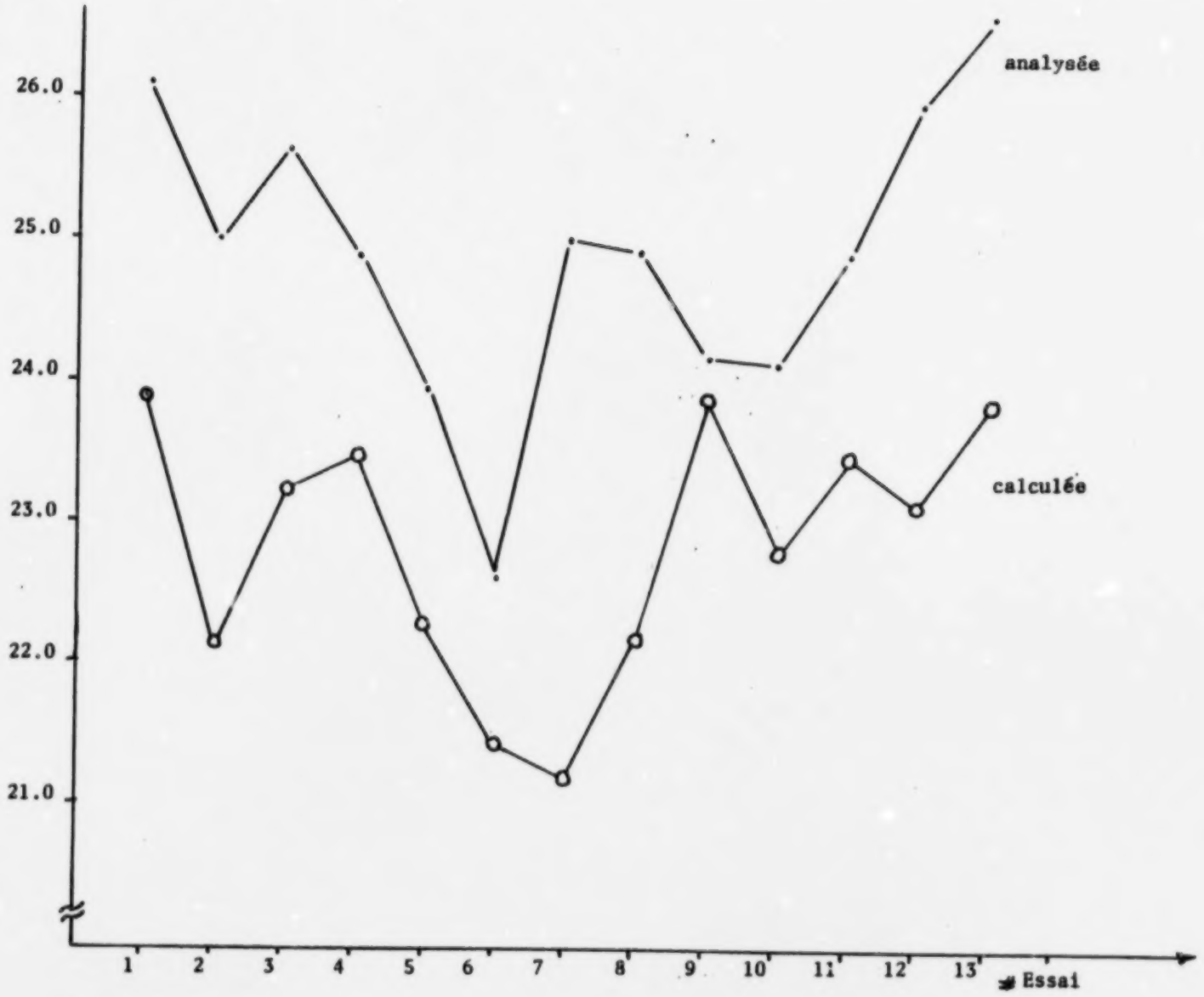

Figure 20. Graphique de la teneur en cendres à l'alimentation en fonction de la séquence d'échantillonnage.

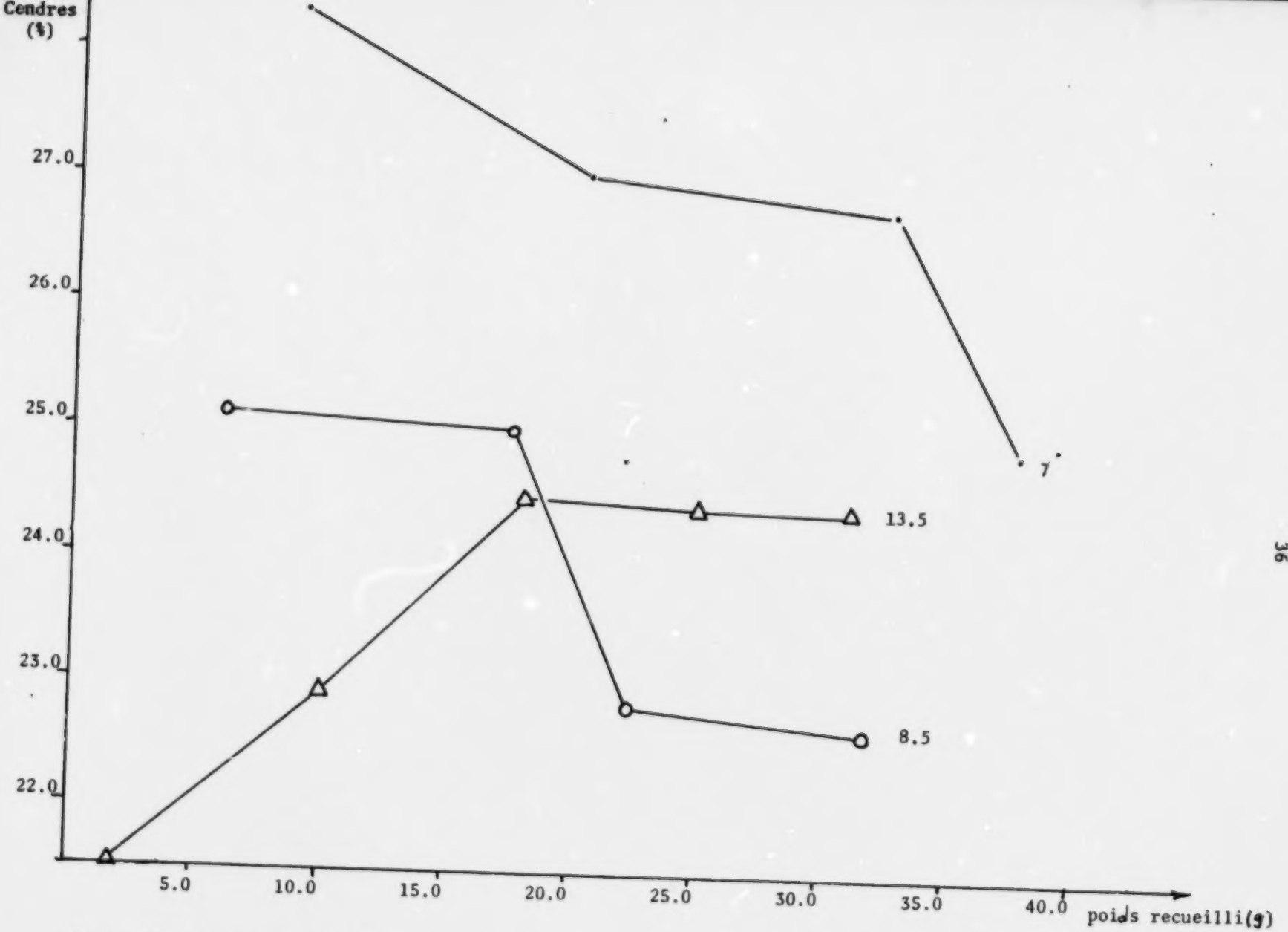

Figure 21. Courbes de la teneur en cendres du concentré en fonction des poids récupérés à divers angles d'inclinaison.

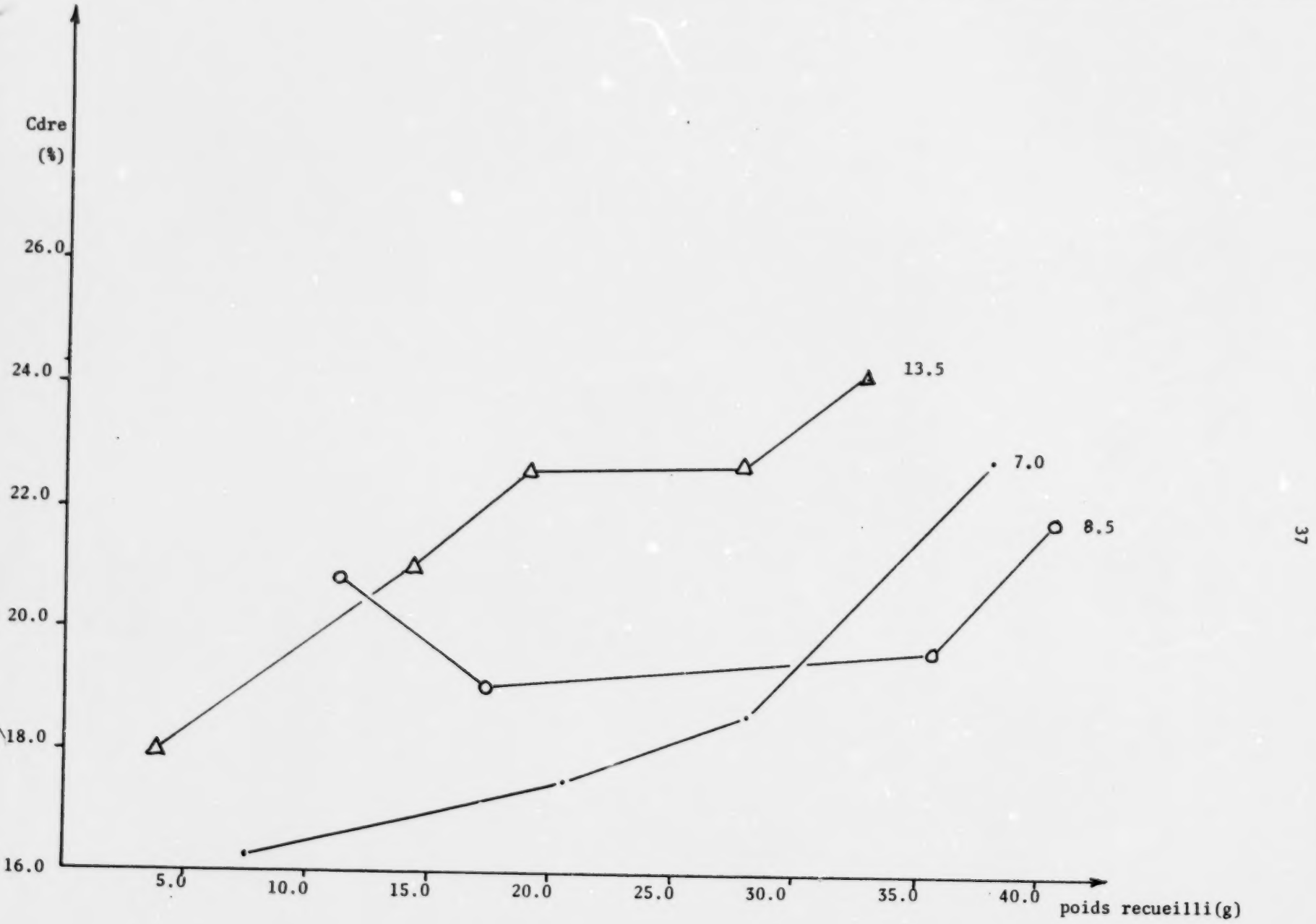

Figure 22. Courbes de la teneur en cendres du rejet en fonction des poids rejetés.

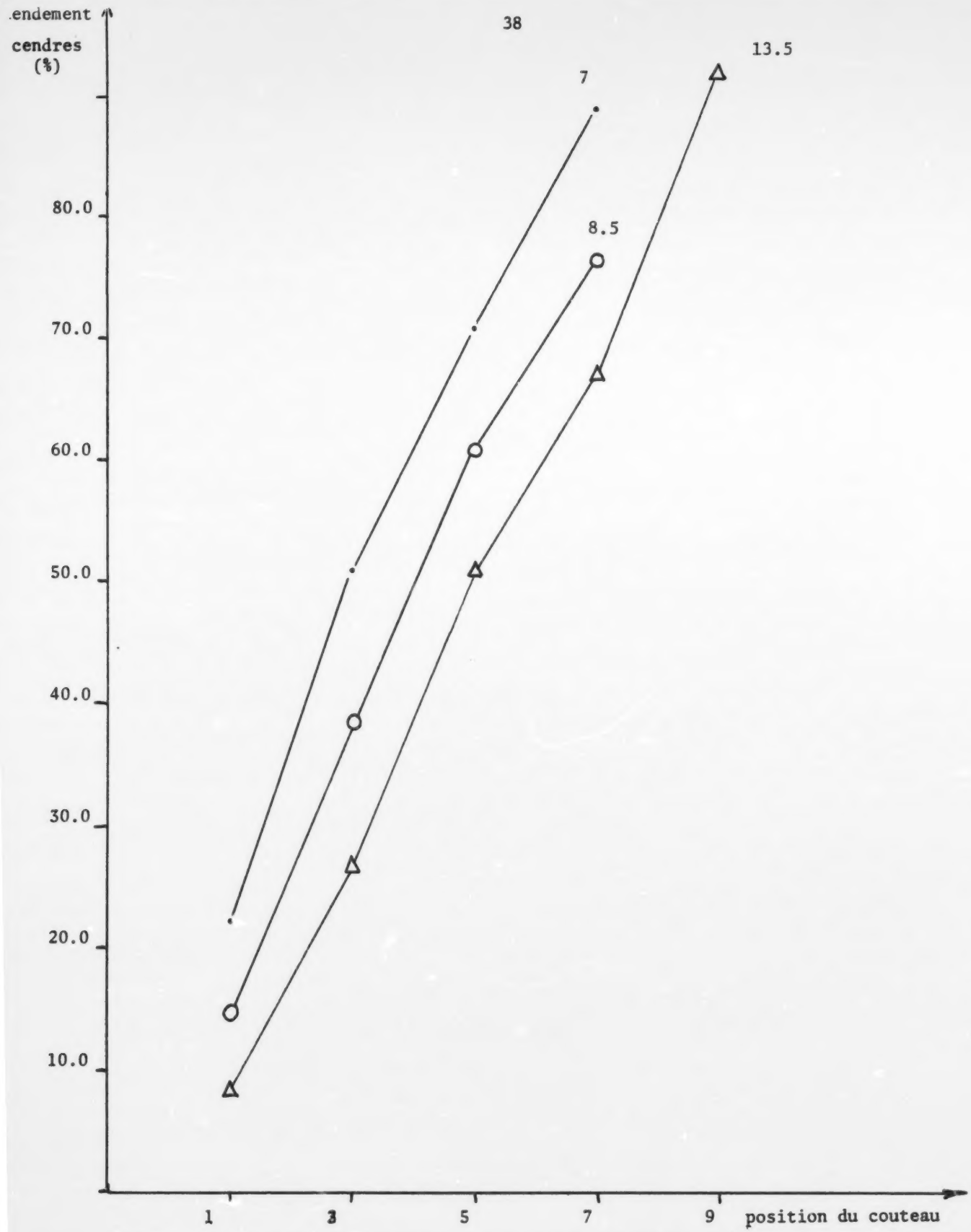

Figure 23. Courbes de rendement des cendres en fonction de l'ajustement du couteau

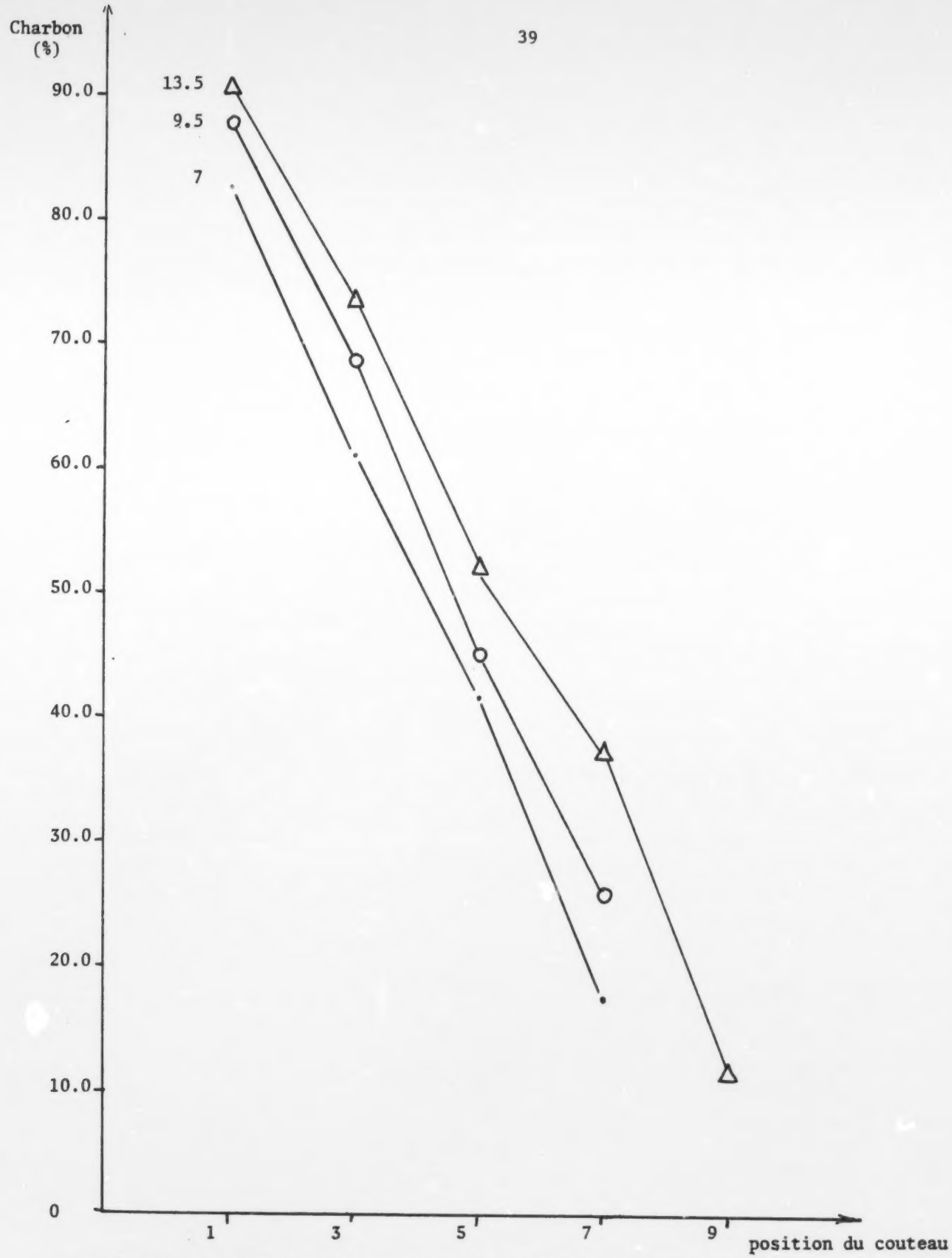

Figure 24. Courbes de rendement du charbon rejeté en fonction de l'ajustement du couteau.

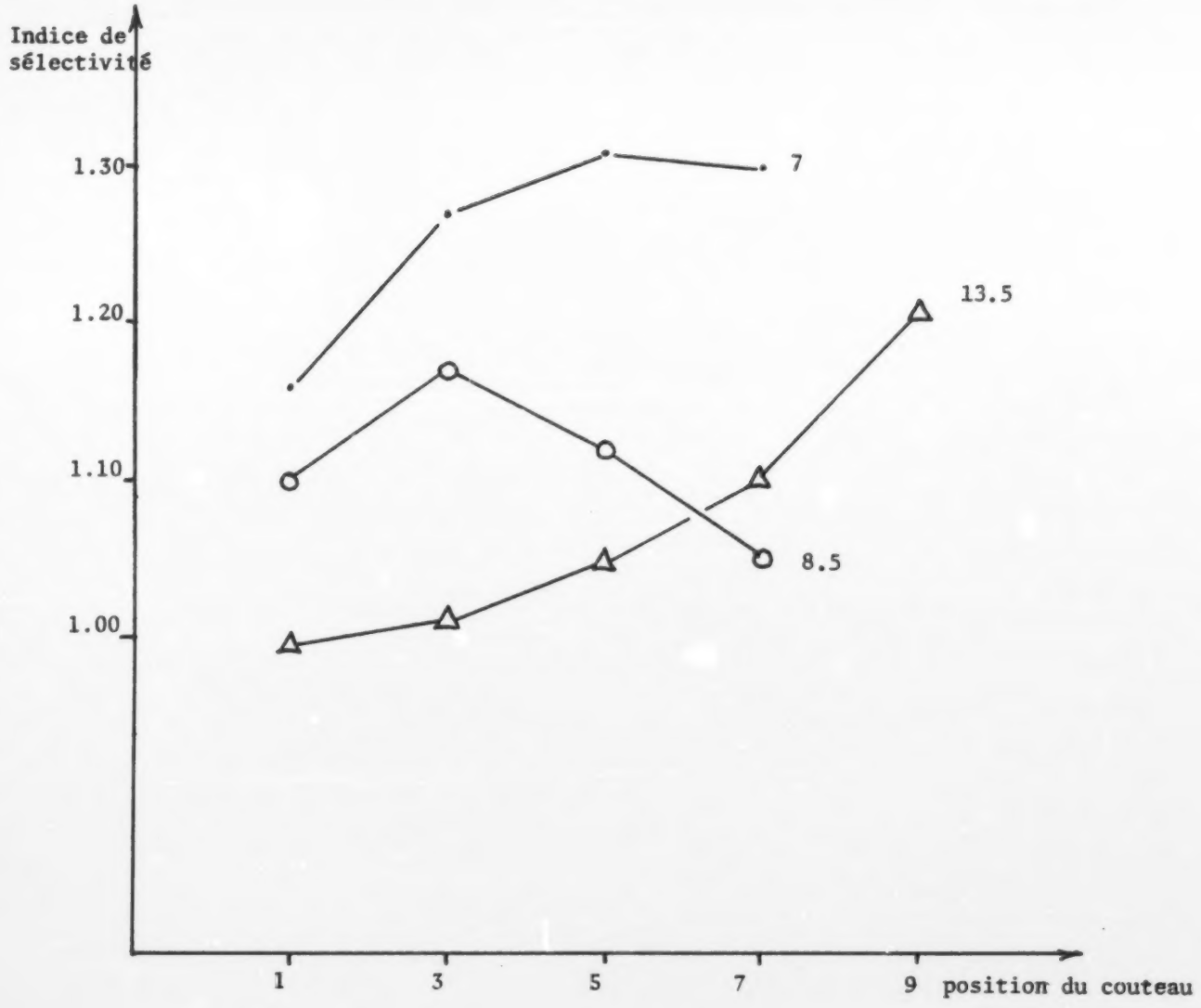

Figure 25. Courbes comparatives des indices de sélectivité en fonction de l'ajustement du couteau et à divers angles d'inclinaison de la planche.

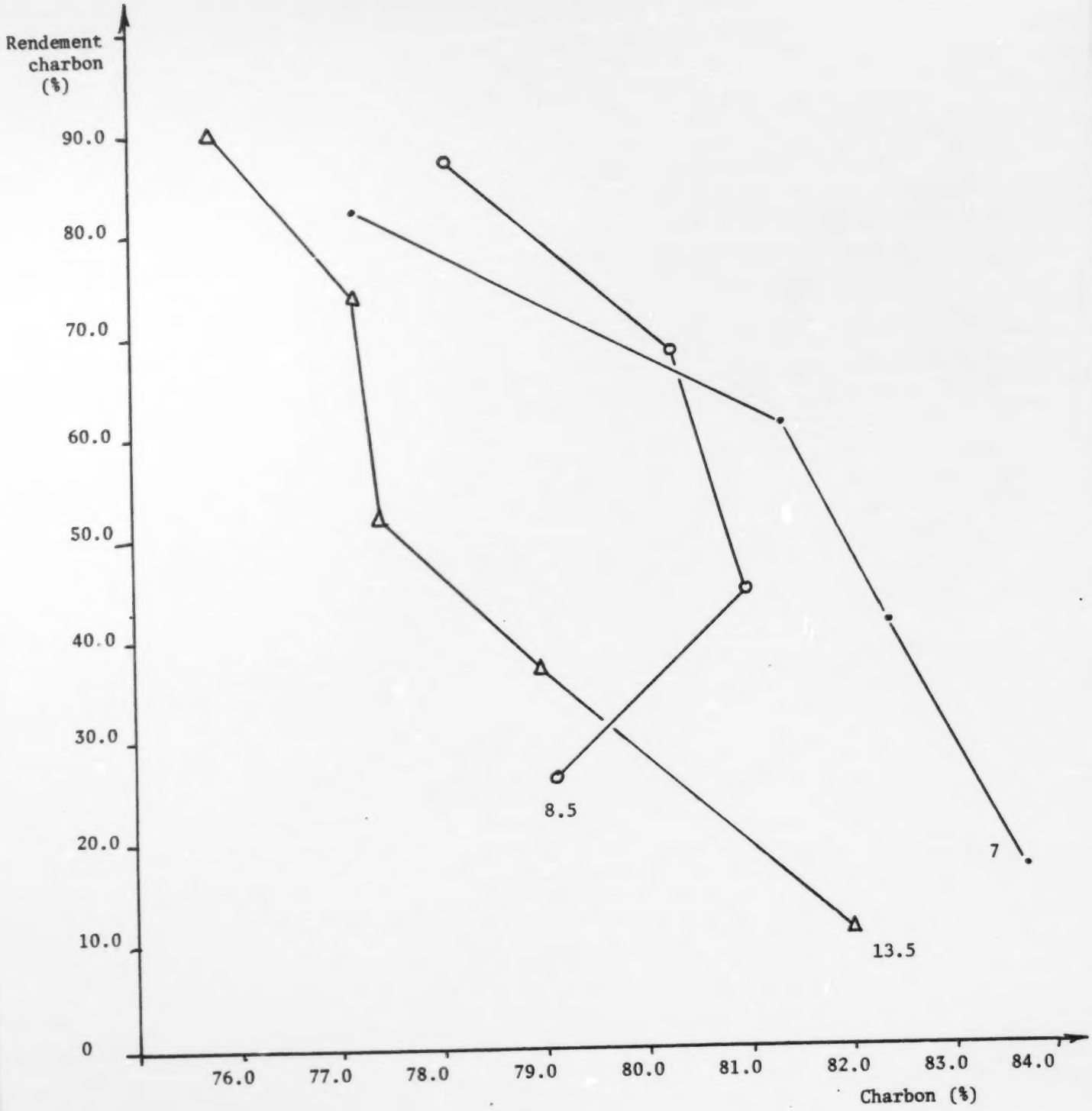

Figure 26. Courbes de rendement (récupération) du charbon en fonction du grade (%charbon = 100- %cendres), pour divers angles d'inclinaison de la planche.

Tableau 4 - Etude granulométrique sur un mélange du 60% de l'essai 3 et 40% de l'essai 7

Classe granulométrique (mailles)	Poids (g)	%Poids	%Cendres	Poids (g)	%Poids	%Cendres	Charbon au rejet	Cendres au conc.	Indice de sélectivité
+60	22,3	69,7	19,99	14,8	67,3	12,05	42,2	71,4	1,02
-60+100	3,8	11,9	24,77	2,1	9,5	17,24	37,8	72,2	1,02
-100	5,9	18,4	32,44	5,1	23,2	31,46	46,7	54,4	1,02
Total	32,0	100,0	22,85	22,0	100,0	17,05	42,5	66,1	1,02

Tableau 5 - Analyses du test de la spirale sur le charbon

Alimentation		Concentré		Mixtes		Rejet		Rend. cendres		Rend. charbon		Selectivité	
%Cendres calculée	%Cendres analysée	Poids (g)	%Cendres	Poids (g)	%Cendres	Poids (g)	%Cendres	Conc.	Conc. mixte	mixtes rejet	rejets	a	b
26,08	26,29	6,9	61,46	4,3	58,21	119,0	23,05	12,5	19,2	95,1	97,2	1,05	1,03

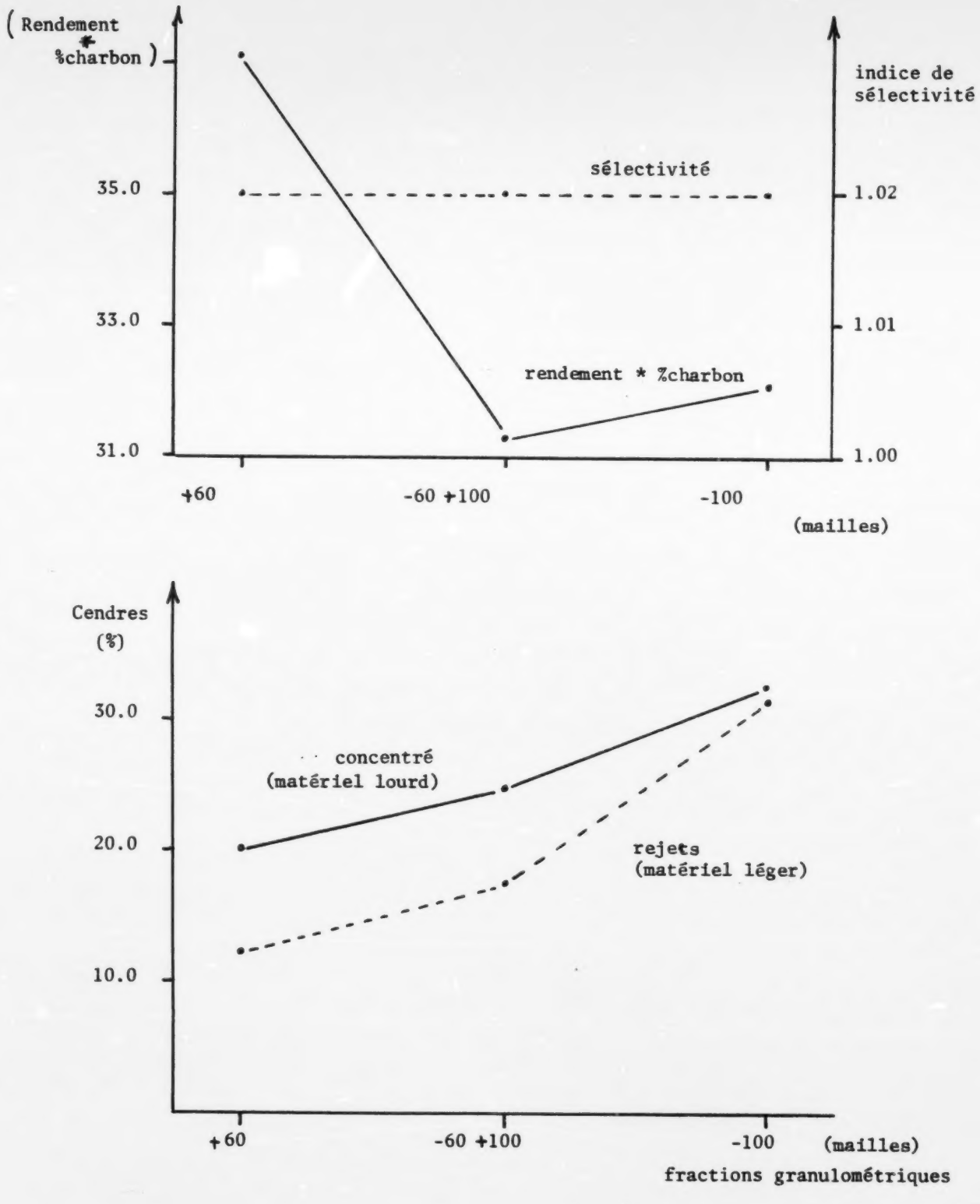

Figure 27. Courbes granulométriques comparatives pour les essais 3 et 7 combinés.

ANNEXE D. CALCULS STATISTIQUES

Il s'agit de comparer deux modèles linéaires:

l'hypothèse nulle $H_0 : \hat{y}_1 = \bar{y}$ la moyenne s'appliquant à toutes les observations.

VS $H_1 : \hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 x_1$ l'équation linéaire simple.

1) Calcul de modèle $\hat{y}_1 = \beta_0 + \beta_1 x_1$

Sous forme matricielle le modèle peut s'écrire ainsi:

$(X'X)\ B = X'Y$ où

X : matrice des x_1

X': matrice transposée des X_1

Y : matrice des y_1

B : matrice des paramètres

On peut isoler B avec la matrice inverse:

$$(X'X)^{-1}(X'X)\ B = (X'X)\ X'Y$$

$$B = (X'X)\ X'Y$$

où $B = \begin{bmatrix} \beta \\ o \\ \beta_1 \end{bmatrix}$ $\quad (X'X)^{-1} = \dfrac{1}{n\Sigma(x_i - x)^2} \begin{bmatrix} \Sigma x_1^2 & -\Sigma x_1 \\ \Sigma x_1 & n \end{bmatrix}$

$$X'Y = \begin{bmatrix} \Sigma_i y \\ \Sigma x_i y_i \end{bmatrix}$$

2) Analyse de la variance.

La variance totale des observations peut être divisée en deux parties, soient la variance expliquée par la régression et la variance résiduelle. Le rapport de ces deux composantes permet de vérifier par un test si le modèle proposé apporte une précision valable sur le comportement des observations. L'étude de la variance peut être mis sous forme de tableau:

Source	Somme des carrés	degré de lib.	carré moyen	rapport
expliquée (régression, β_1)	$\Sigma(y_i-y)^2$	1	$s_e^2=\Sigma(y_i-y^2)$	$\frac{s_e^2}{s_r^2}$
résidueile	$\Sigma(y_i-y_1)^2$	n-2	$S_r^2 = \frac{\Sigma(y_i-y_i)^2}{n-2}$	
Totale	$\Sigma(y_i-y)^2$	n-1		

si $\frac{s_e^2}{s_r^2} > F_{5\%(1,n-2)}$ alors on rejette l'hypothèse nulle H_o. Le modèle correspond bien aux observations dans un intervalle de confiance de 95%.

si $\frac{s_e^2}{s_R^2} > F_{5\%(1,n-2)}$ alors on accepte h_o et le modèle n'apporte pas de précision.

où $F_{5\%(1,n-2)}$: test Fisher avec coefficient d'erreur de 5%.

A) Essai 1. Alimentation

i) Teneur en fer de l'alimentation analysée

$n = 19$ $\quad \Sigma y_i = 833,42$

$\Sigma x_i = 190$ $\quad \Sigma y_i = 36573,5584$

$\Sigma x_i = 2470$ $\quad \bar{y} = 43,86421953$

$\bar{x} = 10$ $\quad \Sigma x_i y_i = 8263,45$

$\Sigma(x_1-\bar{x})^2 = 570$

$$B = \begin{bmatrix} 45,1054386 \\ -\ ,1242105263 \end{bmatrix}$$

analyse de la variance:

Source	Somme des carrés	D.D.L.	Carre Moyen	Rapport
expliquée (régression, β_1)	8,794	1	8,794	20,06 >>
résiduelle	7,454	17	,438	$F_{5\%(1,n-2)}=3,45$
Totale	16,248	18		

On rejette donc l'hypothèse nulle H_0: le modèle correspond bien aux observations.

ii) Teneur en fer de l'alimentation calculée (arithmétique)

N	$= 19$	Σy_i	$= 829,93$
Σx_i	$= 190$	Σy_i^2	$= 36278,2101$
Σx_i	$= 2470$	$\bar{y}$	$= 43,68052632$
$\bar{x}$	$= 10$	$\Sigma x_i y_i$	$= 8190,80$
$\Sigma(x_1-\bar{x})^2$	$= 570$		

$$B = \begin{bmatrix} 45,58403509 \\ -,1903508772 \end{bmatrix}$$

analyse de la variance:

Source	Somme des carrés	D.D.L.	Carre Moyen	Rapport
expliquée (régression, β_1)	20,653	1	20,653	60,77 >>
résiduelle	5,778	17	,3399	$F_{5\%(1,n-2)}=3,45$
Totale	26,431	18		

On rejette donc l'hypothèse nulle H_0; le modèle correspond bien aux observations.

iii) Pourcentage solide de l'alimentation.

N	$= 19$	Σy_i	$= 1168,8$
Σx_i	$= 190$	Σy_i^2	$= 71961,36$
Σx_i^2	$= 2470$	$\bar{y}$	$= 61,51578947$
$\bar{x}$	$= 10$	$\Sigma x_i y_i$	$= 11511,5$
$\Sigma (x_1-\bar{x})^2$	$= 570$		

$$B = \begin{bmatrix} 64,30263158 \\ -\ ,3096491228 \end{bmatrix}$$

analyse de la variance:

Source	Somme des carrés	D.D.L.	Carre Moyen	Rapport
expliquée (régression, β_1)	56,475	1	56,475	183,6 >>>
résiduelle	5,230	17	,3076	$F_{5\%(1,n-2)}=3,45$
Totale	61,705	18		

On rejette donc l'hypothèse nulle H_0; le modèle correspond bien aux observations.

B) Essai 2. Alimentation

i) Teneur en fer de l'alimentation analysée

$N = 24$ $\quad \Sigma y_i = 1046,92$

$\Sigma x_i = 300$ $\quad \Sigma y_i^2 = 45696,7242$

$\Sigma x_i^2 = 4900$ $\quad \bar{y} = 43,62166667$

$\Sigma (x_1 - \bar{x})^2 = 1150$

$\bar{x} = 12,5$

$$B = \begin{bmatrix} 42,57656667 \\ -\ ,0908782609 \end{bmatrix}$$

analyse de la variance:

Source	Somme des carrés	D.D.L.	Carre Moyen	Rapport
expliquée (régression, β_1)	9,696	1	9,696	11,45 >
résiduelle	18,633	22	,847	$F_{5\%(1,n-2)} = 4,30$
Totale	28,329	23		

On rejette donc l'hypothèse nulle H_0; le modèle correspond bien aux observations.

ii) Teneur en fer de l'alimentation calculée (arithmétique)

N	$= 24$	Σy_i	$= 1067,44$
Σx_i	$= 300$	Σy_i^2	$= 47535,2744$
Σx_i^2	$= 4900$	$\bar{y}$	$= 44,47666667$
$\Sigma(x_i-\bar{x})^2$	$= 1150$		
$\bar{x}$	$= 12,5$		

$$B = \begin{bmatrix} 43,35146667 \\ ,098434783 \end{bmatrix}$$

analyse de la variance:

Source	Somme des carrés	D.D.L.	Carre Moyen	Rapport
expliquée (régression, β_1)	11,409	1	11,409	5,26 >
résiduelle	47,692	22	2,168	$F_{5\%(1,n-2)}=4,30$
Totale	59,101	23		

On rejette donc l'hypothèse nulle H_0; le modèle correspond bien aux observations.

iii) Pourcentage solide de l'alimentation.

N	$= 24$	Σy_i	$= 699,4$
Σx_i	$= 300$	Σy_i^2	$= 20392,2$
Σx_i^2	$= 4900$	$\bar{y}$	$= 29,14166667$
$\Sigma(x_1-\bar{x})^2$	$= 1150$		
$\bar{x}$	$= 12,5$		

$$B = \begin{bmatrix} 29,50666667 \\ -\ ,0317391304 \end{bmatrix}$$

analyse de la variance:

Source	Somme des carrés	D.D.L.	Carre Moyen	Rapport
expliquée (régression, β_1)	1,183	1	1,183	$2,788 < F_{5\%(1,n-2)}=4,30$
résiduelle	9,335	22	,424	
Totale	10,518	23		

On accepte donc H_0; le modèle n'apporte pas de precision.

C) Essai sur le charbon. Alimentation

i) Teneur en cendres de l'alimentation analysée

$N = 13$ $\quad \Sigma y_i = 323,9$

$\Sigma x_i = 91$ $\quad \Sigma y_i^2 = 8083,7672$

$\Sigma x_i^2 = 819$ $\quad \bar{y}_i = 24,91538462$

$\Sigma (x_1 - \bar{x})^2 = 192$

$\bar{x} = 7$

$$B = \begin{bmatrix} 24,72450549 \\ ,0318131868 \end{bmatrix}$$

analyse de la variance:

Source	Somme des carrés	D.D.L.	Carre Moyen	Rapport
expliquée	,197	1	,197	
(régression, β_1)				1,61 <<
résiduelle	13,477	11	1,225	$F_{5\%(1,n-2)}=4,84$
Totale	13,674	12		

On accepte donc H_0; le variance du modèle n'est pas significative.

ii) Teneur en cendres de l'alimentation calculée (arithmétique)

N	$= 13$	Σy_i	$= 296,83$
Σx_i	$= 91$	Σy_i^2	$= 6787,5201$
Σx_i^2	$= 819$	$\bar{y}$	$= 22,83307692$
$\Sigma(x_1-\bar{x})^2$	$= 192$		
$\bar{x}$	$= 7$		

$$B = \begin{bmatrix} 22,60197802 \\ ,0385164835 \end{bmatrix}$$

analyse de la variance:

Source	Somme des carrés	D.D.L.	Carre Moyen	Rapport
expliquée (régression, β_1)	,289	1	.289	.328 <
résiduelle	9,689	11	.881	$F_{5\%(1,n-2)}=4,84$
Totale	9,978	12		

On accepte donc H_0; la variance du modèle n'est pas significative.

iii) Pourcentage solide de l'alimentation.

N	$= 13$	Σy_i	$= 245,2$
Σx_i	$= 91$	Σy_i^2	$= 4706,62$
Σx_i^2	$= 819$	$\bar{y}$	$= 18,86153846$
$\Sigma (x_i - \bar{x})^2$	$= 182$		
$\bar{x}$	$= 7$		

$$B = \begin{bmatrix} 21,84835165 \\ -0,4978021978 \end{bmatrix}$$

analyse de la variance:

Source	Somme des carrés	D.D.L.	Carre Moyen	Rapport
expliquée (régression, β_1)	48,323	1	48,323	15,89 >
résiduelle	33,448	11	3,041	$F_{5\%(1,n-2)}=4,84$
Totale	81,771	12		

On rejette donc l'hypothèse H_0; le modèle correspond bien aux observations.